

Simulation des phénomènes de dégradation d'éléments de construction.

**Application d'une méthode basée sur la modification
des performances de matériaux et la propagation
des contraintes.**

THÈSE N° 4857 (2010)

PRÉSENTÉE LE 11 NOVEMBRE 2010

À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
LABORATOIRE DE CONSTRUCTION ET CONSERVATION
PROGRAMME DOCTORAL EN ARCHITECTURE ET SCIENCES DE LA VILLE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Peter ZURBRÜGG

acceptée sur proposition du jury:

Prof. V. Kaufmann, président du jury
Prof. L. Orтели, Prof. C. Morel, directeurs de thèse
Dr J. Hans, rapporteur
Dr J. Menu, rapporteur
Prof. T. Vallée, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2010

A Martine

Résumé

La durabilité des matériaux de construction et des systèmes constructifs est depuis toujours une préoccupation des bâtisseurs. Aujourd'hui, la puissance des moyens informatiques ouvre des voies innovatrices pour aborder la complexité des phénomènes de vieillissement de ces éléments de manière différente.

Ce travail présente une méthode ainsi qu'un modèle de simulation ayant comme objectif la prédiction du vieillissement d'éléments de construction multicouche en tenant compte de la nature et de l'intensité des influences extérieures d'origines climatiques et humaines. Intégré dans des outils informatiques, ce type de simulation ouvre des perspectives pour de multiples applications dans divers domaines : Ce peut p.ex. constituer une aide de décision pour la maintenance de bâtiments, conduire les choix de systèmes constructifs vers des solutions durables ou fournir des informations concernant la durée de vie pour des analyses de cycle de vie (ACV).

La recherche s'appuie sur des travaux effectués conjointement entre le Service d'expertise du LCC de l'EPFL et le laboratoire ARIA de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon (UMR CNRS n°694 MAP, Hervé Lequay) entre 1990 et 1997 pour le développement de l'outil AMB (Assistance à la Maintenance de Bâtiments).

L'objectif du travail présenté était de continuer et de porter plus loin ces investigations. Pour ce faire, l'outil a d'abord été analysé et entièrement recréé dans un environnement de développement *Delphi*. De nouveaux modules d'enregistrement de paramètres et d'analyse graphique ont été ajoutés afin de mieux visualiser le déroulement de la simulation et l'enchaînement des processus de dégradation. Tout le modèle a également été adapté pour être capable d'effectuer des simulations stochastiques selon le principe de *Monte Carlo*. Ce travail a permis de dégager la systématique et la structure des différents aspects et concepts de la méthode de simulation, pour en établir une description détaillée.

Le rapport présente d'abord la méthode prédictive de manière générale. Divers concepts et principes, étant à la base de la modélisation, tels que les contraintes agissant sur les parois, les performances de matériaux et les rôles des éléments de séparation sont décrits. Dans une deuxième partie, le modèle implémenté dans l'outil de simulation est exposé. Ceci pour montrer comment les principes généraux de la méthode ont été concrètement mis en application.

Diverses contraintes et performances spécifiques, participant aux processus de vieillissement, ont été mis en évidence. Le vieillissement proprement dit est simulé par modélisation des interactions entre les contraintes et les performances et se traduit par la diminution de performances. La définition des critères de défaillance d'une paroi donnée, se fait par l'identification de rôles ainsi que l'attribution de valeurs-limite de performances.

Deux chapitres sont consacrés à la description détaillée des différentes contraintes et performances intégrées dans la modélisation. Ils sont suivis de quelques études de cas montrant le fonctionnement de la simulation et illustrant les divers types de résultat pouvant être obtenus.

Les conclusions rappellent que la prévision du vieillissement de matériaux de construction est un thème vaste et complexe. Pour pouvoir établir des prévisions de durabilité non seulement qualitatives mais aussi quantitatives, des recherches seront nécessaires dans divers domaines. Ceci pour mettre en commun la connaissance existante ainsi que pour combler le savoir manquant. Etant donné que la méthode ainsi que le modèle présenté permettent d'intégrer facilement de nouvelles données au fur et à mesure que celles-ci seront disponibles, ils pourraient être la plate-forme de développement pour ces futures investigations. Ceci permettrait d'améliorer progressivement la fiabilité de la prévision.

Mots clés : Durabilité, Vieillissement, Matériaux de construction, Durée de vie, Simulation, Performance, Enveloppe.

Zusammenfassung

Baufachleute sind seit jeher über die Dauerhaftigkeit von Baumaterialien und Konstruktionssystemen bekümmert. Heutzutage erlauben die immer leistungsfähigeren Informatikwerkzeuge innovative Wege zu gehen und die komplexen Phänomene der Bauteilalterung mit neuen Methoden zu imitieren.

Die vorgelegte Arbeit präsentiert eine Methode sowie ein Simulationsmodell mit dem Ziel, eine Vorhersage zu liefern über die Alterung von mehrschichtigen Bauteilen unter Bezugnahme von Art und Intensität der äusseren klimatischen und nutzungsbedingten Einflüsse. Eingebunden in Softwaretools kann diese Art von Simulation in diversen Bereichen Anwendung finden; sei es als Entscheidungshilfe beim Unterhalt von Gebäuden, zur Wahl von dauerhaften Konstruktionssystemen oder um Lebensdauerangaben zu liefern die bei Lebenszyklusanalysen verwendet werden.

Die Arbeit beruht auf vorhergehenden Forschungsarbeiten die gemeinsam mit dem Service d'expertise du LCC de l'EPFL und dem Labor ARIA der l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon (UMR CNRS n°694 MAP, Hervé Lequay) durchgeführt wurden zwischen 1990 und 1997 und zur Entwicklung des Softwaretools AMB (Assistance à la Maintenance de Bâtiments) führten.

Hauptziel dieser Arbeit war es, die vorangegangenen Untersuchungen weiterzuführen und zu erweitern. Dazu wurde zuerst das Simulationstool analysiert und in einer Delphi-Entwicklungsumgebung neu programmiert. Module, die es erlauben sämtliche Simulationsdaten zu speichern und danach graphisch zu analysieren, wurden dazugefügt um den Simulationsablauf und die alterungsprozessbedingten Kettenreaktionen darzustellen. Das ganze Modell wurde angepasst um eine stochastische Simulation nach der Monte Carlo Methode zu erlauben. Diese Arbeiten erlaubten es die Systematik und die Struktur der verschiedenen Aspekte und Konzepte der Simulationsmethode zu erfassen um damit eine detaillierte Beschreibung zu erarbeiten.

Der Bericht präsentiert zuerst die Grundsätze der Vorhersage-Methode. Dazu werden der Modellierung zugrunde liegenden Konzepte und Prinzipien beschrieben, d.h. die Beanspruchungen, die auf die Wände einwirken, die Leistungsmerkmale der Materialien oder die Funktionsrollen der Trennelemente. Danach wird das im Softwaretool eingebaute Modell beschrieben. Dies um aufzuzeigen wie die Grundprinzipien der Methode konkret zur Anwendung kommen können.

Die verschiedenen spezifischen Typen von Beanspruchungen und Leistungsmerkmalen, die an Alterungsprozessen beteiligt sind, wurden ausgewählt. Das eigentliche Altern wird durch die Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Beanspruchungen und Leistungsmerkmalen simuliert und führt zur Minderung der Materialeigenschaften. Die Festlegung der Ausfallskriterien für eine gegebene Wand erfolgt durch Identifizierung der Funktionen sowie Zuweisung von Leistungsgrenzwerten.

Zwei Kapitel sind der detaillierten Beschreibung der im Modell verwendeten Beanspruchungen und Leistungsmerkmale gewidmet. Darauf folgen einigen Fallstudien die die Funktionsweise der Simulation aufzeigen und die verschiedenen Resultate, die durch die Modellierung zu erhalten sind, illustrieren.

Die Schlussfolgerungen rufen hervor, dass die Alterungsvorhersage von Baumaterialien ein weitgefächertes und komplexes Thema ist. Um nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Vorhersagen für Dauerhaftigkeit erstellen zu können, sind weitere Forschungsarbeiten in verschiedenen Bereichen unabdingbar. Dies, um bestehendes Wissen zusammenzufügen sowie auch um Wissenslücken zu schliessen. Da die vorgestellte Methode es erlaubt neue Daten einfach zu integrieren, sobald diese verfügbar stehen, könnte sie bei diesen zukünftigen Arbeiten eine Entwicklungs-Plattform werden. Dadurch könnte die Zuverlässigkeit der Vorhersage laufend verbessert werden.

Schlüsselwörter : Dauerhaftigkeit, Alterung, Baumaterialien, Lebensdauer, Simulation, Leistungsmerkmale, Gebäudehülle.

Abstract

Builders have always been concerned about the durability of construction materials and building components. Nowadays, powerful information technology tools offer an opportunity to approach the complexity of aging phenomena in an innovative way.

This thesis presents a method and a simulation model designed to predict the aging of multi-layer building components. Integrated into a software tool, they take into account the nature and intensity of the external agents acting on a component. The tool creates possibilities for a variety of applications : it can guide users towards the most appropriate and durable construction systems, it can be helpful in decision making for building maintenance and it can provide service-life information for life-cycle analysis (LCA).

The work is based on research undertaken between 1990 and 1997 by the Expert Service from the Construction and Conservation Laboratory (LCC) at the Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) in collaboration with the ARIA-laboratory of the Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon (UMR CNRS n°694 MAP, Hervé Lequay) for the development of the Assistance to Maintenance of Buildings tool (AMB).

The goal of the present work was to continue and extend the previous investigations. In a first step, the tool has been analysed and recreated within the Delphi development environment. New parameter recorder modules and graphical analysing modules have been added for better simulation monitoring and visualisation of chain reactions due to degradation processes. The model has also been adapted to allow stochastic simulation with the Monte-Carlo Method. This part of the research permits bringing out the structure of the simulation method's various aspects and concepts and working out its detailed description.

In the report, global aspects of the prediction method are presented first. Basic concepts and principles, such as stress actions, material performance and element functions, are described. In a second part, the design of the computer model is presented. The aim is to show how the general concepts of the method can find an application.

Various stress agents and specific material performances that participate in the aging process and lead to a decrease in performance are highlighted. Aging is simulated by the interaction between the materials and agents over time. Definitions of the failure criteria for a given building component are made by identification of its functions and assigning performance limits values.

Two chapters are dedicated to the detailed description of the different stress agents and performances used in the model. These are followed by a selection of case studies that shows the working of the simulation and illustrates the various types of results that can be obtained.

The conclusions reiterate that the prediction of construction material aging is a wide and complex subject. To be able to make not only qualitative but also quantitative durability predictions, further research must be undertaken in different domains. This is necessary in order to collect existing knowledge and to obtain missing information. As the presented method and model can easily integrate new data as it becomes available, they could play the role of a development platform for future investigations. This would allow a progressive increase in the reliability of the predictions.

Keywords : Durability, Aging, Building Materials, Service Life, Simulation, Performance, Envelope.

Avant-propos et remerciements

Les phénomènes de détérioration de bâtiments et de matériaux de construction font, depuis de nombreuses années, objet de multiples investigations. Ces études sont menées pour prévenir ou corriger des erreurs de conception et de mise en oeuvre, pour tester la résistance des matériaux face aux sollicitations attendues et garantir leur durabilité et, depuis quelques années, pour pouvoir estimer la durée de vie des constructions dans un but de planifier et coordonner les travaux de maintenance ou d'établir des bilans écologiques.

Le travail présenté dans ce rapport participe à cet effort de mise au point de modèles de prévision numérique concernant la durabilité et à la durée de vie des matériaux et des éléments de construction. Historiquement il s'inscrit dans une suite de recherches et de réflexions qui ont été menées à l'EPFL dans les années 1980 et 1990. Une première approche était développée dans le projet ACE (Aide à la conception des enveloppes) par François Iselin du département d'architecture et Jacques Menu du département de mathématiques. Les expériences de ces recherches ont été reprises vers 1992 dans le projet de recherche AMB (Aide à la maintenance des bâtiments) conduit par François Iselin et Hervé Lequay. Les idées et les méthodes mises au point dans le cadre de ces travaux étaient, à mon avis, innovatrices et originales avec un grand potentiel d'évolution et méritaient que l'on s'y intéresse de près. Ceci pour continuer les travaux qui, pour diverses raisons, ont été arrêté en 1997. Il s'agissait d'une part de faire renaître des cendres et de faire évoluer l'outil informatique AMB. D'autre part il fallait constituer une documentation et une description détaillée de cette modélisation afin de la rendre accessible à la communauté scientifique et permettre son affinement et sa validation.

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans les encouragements et le soutien de nombreuses personnes. Mes remerciements vont en particulier à :

- *Prof. Claude Morel*, pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et surtout pour la confiance et la liberté qu'il m'a accordées pendant toutes ces années de collaboration.
- *Prof. Luca Ortellì*, pour avoir accepté d'être le co-directeur de thèse, pour son soutien financier me permettant de présenter mes travaux dans des conférences ainsi que pour sa sympathie, son esprit ouvert et son écoute dans les cours que nous menons ensemble.
- *Prof. Vincent Kaufmann* (LASUR-EPFL, président du jury), *prof. Till Vallée* (iCEN - EIA-FR, rapporteur), *Dr. Julien Hans* (CSTB, Division environnement, rapporteur) et *Dr. Jacques Menu* (DIT-EPFL et CUI-Uni Genève, rapporteur), pour avoir accepté de faire partie de mon jury et pour le temps qu'ils ont investi à lire et évaluer cette thèse.
- *François Iselin* et *Hervé Lequay*, pour m'avoir généreusement légué tous les documents qui m'ont permis d'accomplir ce travail ainsi que pour m'avoir assisté dans cette tâche avec leurs conseils précieux.
- *Prof. Till Vallée*, pour son amitié et ses conseils précieux lors de la rédaction de la thèse.
- *Marlène Sommer*, grâce à qui j'ai eu l'opportunité de venir à l'EPFL et qui m'a toujours soutenu et conseillé dans mes démarches, pour son amitié et son aide en tant que secrétaire du LCC1.
- *Cristina Boo*, pour son amitié, sa disponibilité et son soutien dans les divers tâches d'enseignement que nous avons mené ensemble.
- *Dan Bolomey*, pour son écoute et ses conseils en tant qu'ami et collègue dans les projets et discussions autour de l'enseignement de la construction.
- *Christiane Roy*, secrétaire de l'école doctorale, pour ses conseils et son aide dans les tâches administratives et relation avec l'école doctorale.
- *Bill Glad*, pour son amitié et son aide professionnelle en tant que relecteur et correcteur des textes et articles en anglais.
- Et surtout à *Martine*, mon épouse, pour son amour, son soutien moral, sa patience, sa compréhension, ses encouragements pendant ses six années de travail.

Lausanne, octobre 2010

Pierre Zurbrügg, architecte

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contenu du travail	2
1.2	Spécificités et enjeux de la méthode	2
1.3	Perspectives d'application	3
1.4	Motivation et situation	4
1.5	Objectifs du travail	4
1.6	Démarche	5
1.7	Organisation du document	6
2	Etat de l'art	9
2.1	Durabilité	9
2.1.1	Approche performantielle	11
2.1.2	Définition de la durabilité	14
2.1.3	Obsolescences	15
2.1.4	Double sens du mot "durable"	16
2.1.5	Durée de vie	17
2.2	Littérature concernant les matériaux de construction	17
2.2.1	Publications scientifiques	17
2.2.2	Traités de pathologies	18
2.2.3	Normes	19
2.3	Méthodes d'estimation de la durée de vie	20
2.3.1	Méthodes statistiques	21
2.3.2	Planification de la durée de vie	23
2.3.3	Méthode factorielle	27
2.3.4	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)	30
2.3.5	La Méthode de Limites des Performances (PLM)	33
2.3.6	Chaîne de Markov	33
2.3.7	Essais de vieillissement	35
2.4	Origines de la méthode	38
3	Méthode	43
3.1	Définition des concepts	43
3.2	Composants surfaciques multicouches	45
3.3	Dégradation	46
3.4	Durée de vie	47
3.5	Principe général	50
3.6	Interactions entre Contraintes et Performances	51
3.6.1	Propagation des contraintes	51
3.6.2	Variation des performances	54
3.7	Milieux	55
3.7.1	Facteurs climatologiques	55
3.7.2	Facteurs d'utilisation	55
3.7.3	Relation entre Milieu et Contraintes	56

3.8	Rôles	59
3.9	Type d'élément et Exigences	61
4	Modèle	65
4.1	Objets du modèle	66
4.1.1	Objet-Paroi	68
4.1.2	Objets-Couche ou Objets-matériau	69
4.1.3	Objets-Milieu	72
4.2	Simulation	77
4.2.1	Initialisation	77
4.2.2	Propagation	80
4.2.3	Variation de performances	81
4.2.4	Détection des défaillances	83
4.2.5	Système de niveaux	84
4.3	Choix de la durée de l'intervalle Δt	85
4.4	Calcul stochastique	87
4.4.1	Variables aléatoires	88
4.4.2	Simulation Monte Carlo	89
5	Contraintes	93
5.1	Usure mécanique	95
5.2	Délavage	98
5.3	Chocs et Poinçonnement	100
5.4	Mouillage	104
5.5	Polluants	107
5.6	Courants d'air	109
5.7	Lumière	113
5.8	Température et vapeur d'eau	118
5.9	Pression CO ₂	122
5.10	Valeur-pH	122
5.11	Gel	123
5.12	Pourriture	125
6	Performances	127
6.1	Epaisseur	129
6.2	Résistance à l'usure et au délavage	130
6.3	Résistance statique	132
6.4	Résistance aux chocs et au poinçonnement	133
6.5	Absorption des chocs	135
6.6	Étanchéité à la lumière	137
6.7	Étanchéité à l'eau	138
6.8	Étanchéité à l'air	139
6.9	Performances hygrothermiques	140
6.10	Diffusivité CO ₂	141
6.11	Aspect	142
6.12	État de surface	143
7	Études de cas	145
7.1	Façade ventilée	146
7.2	Toiture plate	152

8 Conclusions	155
8.1 Apports originaux	155
8.1.1 Relations avec d'autres méthodes	157
8.2 Bilan	157
8.3 Perspectives de recherche	158
8.4 Le mot de la fin	159

ANNEXES

A Exemples de Modèles-matériau	163
A.1 Métaux	165
A.1.1 Corrosion atmosphérique	166
A.1.2 Métaux ferreux (Aciers)	170
A.2 Mortiers hydrauliques	173
A.3 Terres cuites	175
A.3.1 Briques de terre cuite	175
A.3.2 Tuiles de terre cuite	176
A.4 Bois	178
A.4.1 Couches de bois continues	178
A.4.2 Lattage de bois	180
A.5 Peintures	182
B Modélisation de la carbonatation	187
B.1 Vérification mathématique.	190
B.2 Analogies entre différents phénomènes de diffusion	193
C Documents Projet de recherche AMB	195
C.1 Historique de la méthode	195
C.1.1 ACE - Aide à la conception des enveloppes	195
C.1.2 AMB - Assistance à la Maintenance des bâtiments	197
C.1.3 Objectifs de l'outil AMB	199
C.2 Article ACE	200
C.3 Article AMB	204
D Littérature	217
D.1 Publications CIB	217
D.2 Proceedings DBMC	218
D.3 Collection <i>Schadenfreies Bauen</i>	219
E Bibliographie	221
F Table des figures	231
G Liste des tableaux	233
H Curriculum Vitae	234

Chapitre 1

Introduction

Aujourd'hui, pour affronter les enjeux du futur de notre société et répondre à la demande de réduction de consommation de ressources matérielles, énergétiques et financières, tout en maintenant le niveau de qualité actuel, la plupart des secteurs économiques adoptent des analyses et démarches systémiques. Pour le secteur du bâtiment cela se traduit par une *approche performantielle de la construction*¹. Cette approche consiste, dans un premier temps, à la définition claire des objectifs à atteindre. Ensuite, lors de la planification et l'exécution, il s'agit d'orienter les choix de telle façon que les buts fixés peuvent être atteints. Pour pouvoir introduire ces nouvelles exigences dans le processus de planification et donner des garanties quant au respect des objectifs fixés, les concepteurs doivent disposer de nouvelles méthodes de planification accompagnées outils d'évaluation.

Selon Sjöström et al. (2005), *lier des choix de conception à des critères de performance a pour conséquence de ne pas considérer uniquement des critères de courte durée (coûts directs, procédés d'installation et de construction etc.) mais également d'impliquer des aspects de longue durée tels que durée de vie, performance durant l'exploitation, durabilité, coût de cycle de vie ou des facilités de maintenance*².

Une approche méthodique incluant des critères de durabilité a déjà été proposée par Blachère (1966) il y a 40 ans. Dans son ouvrage SAVOIR BÂTIR, Blachère tente de *donner essentiellement le cadre général de la conception scientifique du bâtiment et des exemples de sciences choisis en général parmi les plus méconnues...*³. Pour ce faire, son ouvrage est structuré en trois parties : *Quelques sciences de l'habitabilité, La science de la durabilité et L'économie*. Après une présentation des principaux matériaux de construction avec leur comportement, il conclut le chapitre SCIENCE DE LA DURABILITÉ en constatant que cette science est *"nécessairement complexe et toujours incomplète dans ce qui touche à la durabilité des matières elles-mêmes et à la protection de celles-ci. Mais bien loin d'être impuissante pourtant dans ce domaine, elle offre déjà le moyen de prévoir le comportement des assemblages de matériaux. Ainsi cette science existe, elle doit être connue des utilisateurs et il appartient aux chercheurs de la perfectionner."*⁴

Par la présentation d'une nouvelle méthode d'évaluation de la durabilité d'éléments de construction, ce travail tente d'apporter une pierre à l'édifice qu'est la *Science de la durabilité*.

¹En anglais *Performance Based Building*

²Sjöström et al. (2005), p.13 - ... Relating design decisions to performance criteria means to shift the concern from short-term concerns (direct cost, installation and construction process, etc) to equally involve long term concerns, such as service life, life performance, durability, life cycle cost, maintainability etc. / trad. de l'auteur

³Blachère, (1969), Introduction à la première édition, p.VII

⁴Blachère (1969), p.215

1.1 Contenu du travail

Le rapport de thèse présente une méthode et un modèle prédictifs permettant de simuler, à l'aide d'un outil informatique, le vieillissement d'éléments d'enveloppe tels que des façades, des toitures etc. tout comme d'autres éléments surfaciques comme des parois intérieures ou des planchers. La composition de l'élément ainsi que les conditions environnantes peuvent être définies librement. La première à partir d'une bibliothèque de matériaux configurables, les deuxièmes par paramétrage. Les résultats de simulations obtenues sont l'évolution de certaines caractéristiques du composant dans le temps ainsi que des messages sous forme d'événements lorsque certaines valeurs de simulations franchissent des limites critiques. Ces événements comportant également l'âge du composant au moment de leur apparition, peuvent être utilisés pour l'estimation de la durée de vie de l'élément de construction analysé.

Ce travail de recherche est une continuation d'investigations effectuées conjointement entre le Service d'expertise du LCC de l'EPFL et le laboratoire ARIA de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon (UMR CNRS n°694 MAP, Hervé Lequay)⁵ dans la période de 1990 et 1997. Elles portaient sur le premier développement de la méthode ainsi que la création d'un outil opérationnel AMB (Aide à la Modélisation de Bâtiments) qui fût présenté dans les années 1990 en Suisse et à l'étranger⁶.

1.2 Spécificités et enjeux de la méthode

L'originalité de la méthode présentée réside principalement dans le fait que le calcul de l'évolution de *performances* d'un composant se fait à partir des *performances des matériaux* assemblés en couches et par l'interaction de ces derniers avec les *contraintes* générées par l'environnement.

Cette approche permet une très grande flexibilité quant au type et à la matérialisation d'un composant puisque chaque modèle de composant est un assemblage de modèles-matériau issus d'une bibliothèque préexistante.

Le principal enjeu pour une réussite de la méthode est le fait que de nombreuses caractéristiques de matériaux liés à la durabilité sont actuellement inconnues. Ainsi, au même titre que l'on connaît aujourd'hui pour tous les matériaux de la construction la conductivité thermique (λ) et le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ), il était nécessaire de connaître un *facteur d'abrasion* décrivant l'usure mécanique en fonction d'une sollicitation normalisée, un coefficient d'étanchéité à l'eau permettant de déterminer la quantité d'eau pouvant traverser le matériau etc. Parfois, ces caractéristiques ne peuvent pas être réduites à une seule valeur mais doivent être décrites par des fonctions qui tiennent compte de paramètres secondaires.

⁵Voir www.aria.archi.fr/produits/amb/amb.html.

⁶Voir aussi annexe C.1 - Historique de la méthode.

1.3 Perspectives d'application

Un outil permettant de simuler le vieillissement d'éléments de construction selon la méthode décrite dans ce rapport pourrait trouver des applications dans différents domaines :

Planification

Lors de l'élaboration d'un projet de construction, les concepteurs (architectes, ingénieurs et constructeurs) ont depuis plusieurs années de plus en plus recours à des simulations numériques pour "tester" le comportement d'un ouvrage avant sa construction. Que ce soient des simulations visuelles (images de synthèse), énergétiques, acoustique ou d'éclairage, elles servent essentiellement à la détermination des mesures constructives nécessaires au "bon fonctionnement" d'un bâtiment. Ces simulations, rendues possible grâce à l'évolution de l'informatique, sont devenues des outils incontournables pour le planificateur d'aujourd'hui qui doit maîtriser des projets de plus en plus complexes. Dans un domaine où chaque oeuvre est un proto-type, elles permettent de diminuer le risque d'erreurs de conception par conséquent de réduire les travaux d'adaptation très onéreux pendant ou après le chantier.

Une simulation de la durabilité matérielle d'éléments de construction peut être inscrite dans cette même famille. Elle permettra :

- de détecter et corriger des défauts de conception pendant la phase de planification ;
- de prédire la fréquence d'intervention sur le bâtiment en service et d'optimiser la construction dès le départ en fonction de ce paramètre ;
- de simuler le vieillissement de nouveaux types de construction pour lesquels on n'a pas encore le recul nécessaire pour connaître leur comportement dans le temps.
- de fournir des données concernant la durée de vie des composants qui sont nécessaires pour effectuer des analyses de cycle de vie (ACV).

Gestion d'immeubles

Soucieux de la maintenance et de l'entretien d'immeubles, les gestionnaires ainsi que les propriétaires d'immeubles pourraient également être intéressés par ce type de simulation. Gérer efficacement un parc immobilier nécessite, entre autre, de bien connaître l'état de la substance bâtie et de savoir à quel moment effectuer telle ou telle intervention afin d'éviter la dégradation de la construction. Un outil de simulation leur permettra :

- de déterminer la fréquence de contrôle et la remise en état préventive de parties de construction avant l'apparition de dégâts ;
- d'établir une planification des interventions à moyen et à long terme et d'en tenir compte dans le plan financier ;
- d'estimer les coûts de maintenance lors d'acquisition de nouveaux immeubles.

Expertises

En cas de dégâts ou de dégradations prématurées d'un élément de construction, des experts en pathologie du bâtiment sont amenés à déterminer les causes du dysfonctionnement et de proposer des solutions de réparation. Pour eux, une simulation des cas d'expertise aiderait à :

- vérifier des hypothèses et à expliquer des phénomènes de dégradation ;
- mettre au point des principes de réparation des dégâts.

Formation

Intégré dans la formation de futurs architectes et ingénieurs, un outil didactique simulant le comportement des matériaux dans leur environnement pourra être utilisé pour :

- faire découvrir aux étudiants les compatibilités et incompatibilités entre les différents matériaux de construction ;
- vérifier rapidement leur proposition dans le cadre d'exercices de projet et de construction.

1.4 Motivation et situation

Motivation

Lorsqu'en 2004, l'auteur a désiré entreprendre des recherches dans la perspective d'obtenir d'un titre de docteur en sciences à l'EPFL, le choix de continuer le développement de l'outil AMB s'est imposé tout naturellement. Premièrement parce que, par sa double-formation, il possède des connaissances dans la programmation en langage Pascal, dans la simulation ainsi que dans les domaines de la construction et des matériaux. Deuxièmement, parce que le choix de ce sujet était une opportunité de continuer des travaux qu'il estimait être très avant-gardiste, avec un grand potentiel d'évolution, et méritant d'être poursuivis et décrits dans une publication majeure. Ceci d'autant plus que tout développement y relatif avait été arrêté depuis 1997, et que l'outil était devenu vétuste du fait qu'il ne pouvait plus fonctionner sur des ordinateurs récents.⁷ Une reprise de ces travaux était donc indispensable pour ne pas perdre le fruit de plusieurs années de recherche.

Documents à disposition

Dans le cadre de la poursuite des recherches, les documents internes suivants ont été transmis à l'auteur :

- Code de programmation en langage Pascal
- Deux bases de données en format Hypercard contenant des données de matériaux de construction et servant de plate-forme d'échange d'information entre les deux auteurs d'AMB.
- Le mode d'emploi d'AMB.
- Divers classeurs contenant des documents bruts ayant servi à l'élaboration de la méthode.
- Divers classeurs concernant des présentations et la vente d'AMB.
- Les diverses publications présentant l'outil.⁸

1.5 Objectifs du travail

L'analyse du logiciel et de la documentation reçue par les auteurs d'AMB mettait en évidence quelques points sur lesquels de futures recherches devaient être axées pour assurer, à la fois, une continuité avec les travaux précédents et une possibilité d'intégrer de nouveaux apports. La problématique de la prédiction du vieillissement, pour un grand nombre de matériaux de construction, dans un seul outil ne pouvant pas être traitée par une équipe restreinte d'une ou deux personnes, il est alors devenu indispensable de rendre les concepts et la construction du modèle accessible au monde scientifique.

Ces impératifs ont, entre autre, orienté le choix les objectifs de la thèse :

Description et illustration détaillées de la méthode et du modèle

Bien que les auteurs d'AMB aient porté ce projet de recherche ambitieux assez loin dans un laps de temps relativement court, on doit constater que la priorité était donnée au développement de l'outil informatique. Ceci permettait d'une part de tester rapidement l'application des principes proposés et, le cas échéant, de les adapter pour obtenir les résultats attendus. D'autre part, cela offrait la possibilité de montrer le fonctionnement de l'outil à un large public en vue d'une commercialisation. Dans ce contexte, la documentation technique était réduite au strict minimum. Par l'absence de documents concernant la construction de l'outil, on peut supposer que celle-ci ainsi que l'implémentation des divers concepts se faisait directement et continuellement en fonction des discussions entre les auteurs. Toutefois, l'échange d'informations entre l'expert et le programmeur concernant les modèles de matériaux se faisait par l'intermédiaire de deux bases de données. C'est pourquoi l'objectif majeur de cette thèse a été de documenter, de structurer et de rendre intelligible les divers concepts et algorithmes utilisés pour cette simulation des phénomènes de dégradation. Ceci devait se faire en grande partie par l'analyse du code source même.

⁷Voir aussi paragraphe 2.4 et annexe C.1.

⁸Voir annexe C.3 Article concernant AMB.

Mise en rapport avec d'autres recherches dans les mêmes domaines

Entre 1997, date de l'arrêt des travaux de recherche, et aujourd'hui, une normalisation (ISO 15686) ainsi que diverses autres méthodes prévisionnelles ont été développées. Un objectif était de faire des parallèles avec ces travaux pour déterminer s'il y avait un intérêt de combiner les démarches ou si certains résultats pouvaient être repris et servir à développer le modèle.

Ajout de la dimension aléatoire

Un autre objectif était d'intégrer dans le modèle des fonctions permettant une simulation stochastique. Ceci pour répondre aux remarques des auteurs d'AMB sur le fait que les divers événements de défaillance ne devraient pas être exprimés par un résultat discret mais plutôt par des valeurs associées à des probabilités comme cela se fait pour les prévisions météorologiques.

Recherche documentaire

L'ambition de la méthode décrite dans cette thèse est de permettre la simulation de phénomènes de dégradation pour une large gamme de composants constitués de différents matériaux et mis dans des situations très variées. Cette démarche nécessite une approche globale de la problématique du vieillissement des matériaux de construction ainsi que de leurs processus de détérioration. Pour cette raison, un objectif a été de récolter un maximum d'informations "enfouies" dans la grande quantité de publication du domaine de la pathologie des matériaux. Ceci dans le but d'intégrer ces données dans les différents modèles de matériaux.

1.6 Démarche

La démarche pour les travaux de recherche a d'une part été dictée par le fait que l'outil AMB devait être revu entièrement. D'autre part, il y avait le constat que l'organisation et la construction du code de programmation d'AMB n'ont jamais été documentées et devait donc être extraites de la source du programme même.

Programmation du logiciel

Dans un premier temps, ce code source de l'outil AMB a été analysé en détail. Ceci pour en déterminer la structure de la modélisation ainsi que les séquences et algorithmes utilisés pour l'exécution de la simulation.

Ces données ont permis, dans un deuxième temps, de recréer un outil dans un environnement de développement *Delphi*. Pour ce faire, les structures de l'ancien programme ont été entièrement réorganisées et complétées pour rendre les différents modules plus indépendants les uns des autres et plus flexibles pour de futures adaptations. En même temps, des fonctions d'enregistrement et de visualisation de tous les paramètres de simulation ont été intégrées pour permettre une analyse détaillée du déroulement de la simulation. Ceci par des animations dynamiques ou par différentes présentations graphiques. Dans l'étape suivante, le modèle a été adapté pour pouvoir effectuer des simulations stochastiques selon la méthode *Monté Carlo*.⁹ De ce travail est issu une version entièrement neuve de l'outil de simulation. Sa conception globale est décrite au chapitre 4 MODÈLE. Elle a également servi pour établir les études des cas présentées au chapitre 7.

Recherche de documentation concernant la durabilité des matériaux

En parallèle avec les travaux de programmation, un travail de recherche documentaire a été accompli, pour extraire des publications du domaine de la durabilité des matériaux, les indications et informations concernant les différents concepts utilisés dans la modélisation. Ceci dans le but d'intégrer ces données dans les divers modèles. Ces investigations ont été menées dans la littérature traitant des différentes sollicitations climatiques et humaines qui agissent sur les éléments de construction ainsi que dans des textes présentant des caractéristiques de matériaux et des phénomènes de dégradation. Les résultats de cette partie de la recherche sont intégrés à chaque fois directement dans la présentation des divers concepts soit dans le chapitre 3 MÉTHODE, dans le chapitre 5 CONTRAINTES, le chapitre 6 PERFORMANCES et dans l'annexe A

⁹Voir paragraphe 4.4.

MODÈLES DES MATÉRIAUX.

Aspects constructifs

En même temps, d'autres réflexions et développements concernant des aspects constructifs ont pu être menés grâce à l'expérience et le savoir faire d'architecte, comme par exemple, la détermination des diverses fonctions des enveloppes ou la classification des divers types d'éléments de construction d'après leur situation¹⁰.

Rédaction de la thèse

Par la suite, l'ensemble de ces aspects, issus des domaines de la modélisation informatique, de la science des matériaux et de la construction, a été utilisé pour l'organisation et la rédaction de la thèse. Dans les chapitres, les divers éléments traités, provenant de domaines différents, sont volontairement présentés en parallèle. Ceci parce que, dans ce travail, ils sont fortement liés et s'influencent mutuellement. Cette présentation est également le reflet de la démarche transdisciplinaire qui est à l'origine de ce travail. Pris séparément, les différents aspects ne sont pas nouveaux et font souvent partie d'une connaissance bien établie. Leur mise en relation, par contre, permet d'obtenir un regard nouveau et ouvre des voies à une démarche innovante.

1.7 Organisation du document

Une des difficultés rencontrées lors de l'élaboration de cette thèse a consisté à décrire les divers concepts utilisés dans le modèle de manière séparée et successive malgré le fait qu'ils soient fortement interdépendants. Après l'étude de diverses variantes, l'organisation suivante a semblé être la plus adéquate pour présenter les différents aspects du travail de recherche de manière claire et compréhensive.

Le chapitre 2 - ETAT DE L'ART donne un aperçu des diverses recherches effectuées ou en cours en relation avec la thèse. Après quelques réflexions concernant les notions de durabilité et de durée de vie, divers types d'ouvrages traitant de la durabilité sont présentés, suivi d'une brève description de différentes approches pour estimer la durée de vie. Une description des origines de la méthode présentée dans cette thèse termine ce chapitre.

Le chapitre 3 - MÉTHODE décrit les divers concepts et constatations étant à la base de la construction du modèle de simulation. Il s'agit de la définition des notions *Contrainte*, *Performance*, *Rôle*, *Milieu* etc. ainsi que de la présentation des diverses relations entre elles qui sont déterminantes pour la dégradation des matériaux.

Le chapitre 4 - MODÈLE présente l'application de la *méthode* pour en créer un outil de simulation. Après une description de la structure du logiciel, il est exposé comment les notions, définies auparavant, ont été "matérialisées" sous forme d'objets informatiques et comment se déroule la simulation. Ce chapitre comporte également une étude concernant le choix de l'intervalle d'incrémentation du temps utilisé dans la simulation ainsi que la présentation du calcul stochastique.

Le chapitre 5 - CONTRAINTES énumère les différentes contraintes implémentées dans la simulation une par une. Ceci en indiquant leurs conditions d'apparition, leur influence sur les matériaux, les références bibliographiques les concernant, la définition de leur échelle d'intensités et l'algorithme utilisé pour définir les valeurs initiales.

Le chapitre 6 - PERFORMANCES donne pour les différentes performances utilisées dans les modèles de matériaux, leur signification et la définition de leur échelle de niveaux.

Le chapitre 7 - ETUDES DE CAS montre, à travers deux études de cas, l'utilisation de l'outil ainsi que

¹⁰voir paragraphe 3.9.

les différentes formes de résultats pouvant être obtenues.

Le chapitre 8 - CONCLUSIONS conclut la thèse par un rappel des divers apports originaux et par des propositions permettant d'orienter de futures recherches.

L'annexe A - MODÈLES DES MATÉRIAUX illustre, à titre d'exemple, la modélisation de quelques matériaux de construction. Ces descriptions comprennent des considérations constructives, des données scientifiques concernant le comportement de vieillissement ainsi que la définition des performances initiales et les règles de dégradation pour chaque matériau.

L'annexe B - MODÉLISATION DE LA CARBONATATION développe une méthode pour intégrer le calcul de la carbonatation à travers plusieurs couches dans le modèle.

L'annexe C - DOCUMENTATION AMB retrace d'abord l'historique des outils ACE et AMB. Deux articles, représentatifs pour chacun entre eux, sont reproduits à la suite et donnent un aperçu de ces travaux.

Chapitre 2

Etat de l'art

Ce chapitre ETAT DE L'ART a été organisé en 4 parties pour présenter les différents écrits, théories ou recherches ayant une relation directe ou indirecte avec la thèse.

DURABILITÉ : Cette première partie, sert à tracer le contexte dans lequel s'inscrit le présent travail et de mener quelques réflexions générales concernant les notions *durabilité* et *durée de vie*.

LITTÉRATURE : La deuxième partie donne un aperçu de différents types d'écrits qui traitent de la science des matériaux de construction. De nombreuses indications concernant des caractéristiques de matériaux et de processus de dégradation peuvent être trouvées dans cette littérature.

MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE : Ces paragraphes sont consacrés à une brève description des différentes approches utilisées pour estimer la durée de vie d'éléments de construction. Ceci pour montrer la diversité des démarches et pour mettre en évidence d'éventuels liens ou parallèles avec le présent travail.

BASES DE CE TRAVAIL : Dans cette dernière partie, les origines de la méthode de simulation ainsi que la situation en 2004, début du présent travail de thèse, sont rappelées.

2.1 Durabilité

L'homme construit des abris, des bâtiments, des ponts, des routes etc. depuis sa sédentarisation il y a des milliers d'années. Au cours des siècles, il a appris à travailler et à construire avec les matériaux que la nature a mis à sa disposition. A l'instar des produits en terre cuite, il a également trouvé des moyens pour les transformer et, par ce fait, d'améliorer leurs caractéristiques primaires. Les systèmes constructifs ont progressé avec l'évolution du savoir-faire. Le choix des matériaux et des techniques de construction dépendait de la disponibilité des ressources matérielles et financières ainsi que de l'affectation de l'ouvrage. Ce choix avait également une influence sur la durabilité de l'ouvrage. Ainsi, une grande partie des édifices qui nous sont parvenus depuis des siècles voir des millénaires, ont été construit en pierre, un matériau durable et résistant aux intempéries. Les nombreux ponts romains, encore visibles aujourd'hui, en sont un bel exemple (voir figure 2.1). D'autres ouvrages, tel que l'ancien temple de Syracuse, transformé en cathédrale (figure 2.2), ont résisté au temps car ils ont constamment été occupés et entretenus. Une troisième catégorie nous est parvenue sous forme de vestiges qui, par leur enfouissement ou leur submersion, se sont retrouvés dans des conditions qui ralentissent les phénomènes de dégradation. Les villes romaines de Pompeï ou les découvertes en Égypte sont des exemples de ce type de conservation.

Ces exemples montrent qu'à priori, la durabilité d'un bâtiment ou d'un composant peut être extrêmement longue. Lorsque les bonnes conditions sont réunies, les matériaux tel que les pierres, les verres, les peintures et même les bois peuvent survivre pendant des siècles sans se détériorer de manière significative. On peut en



FIG. 2.1 – Pont romain d'Ambrussum, France
I^{er} siècle apr. J.-C.
Un ouvrage en pierre vieux de 2000 ans



FIG. 2.2 – Cathédrale de Syracuse, Sicile
Un bâtiment entretenu depuis plus de 2000 ans

conclure que leur longévité dépend fortement du contexte et de l'environnement dans lequel ils sont situés.

L'importance du choix des matériaux ainsi que du système constructif adéquat en vue d'assurer une certaine durabilité n'est pas une préoccupation récente. Vitruve écrit déjà au 1^{er} siècle av. J.C. : *"En toutes sortes d'édifices il faut prendre garde que la Solidité (firmitas), l'Utilité (utilitas) et la Beauté (venustas) s'y rencontrent. Pour la Solidité, on doit avoir principalement égard aux fondements qui doivent être creusés jusqu'au solide, et être bâtis des meilleurs matériaux qui se pourront choisir sans rien épargner. ..."*¹. Le sens de *firmitas*, traduit par Perrault avec le terme *Solidité*, peut, à première vue, être interprété comme une qualité de stabilité et d'intégrité de l'ouvrage. En même temps on peut aussi y lire une indication de durabilité. Ceci dans le sens qu'un édifice, *bâti des meilleurs matériaux*, résiste aussi mieux aux influences du temps. Dans le deuxième livre, Vitruve aborde la question de durabilité plus explicitement : *"Ceux donc qui voudront observer les préceptes que j'ai mis dans ce livre y pourront trouver la manière de faire des bâtiments qui soient de durée. Car la maçonnerie qui paraît belle à la vue à cause qu'elle est faite de pierre qui ont été aisées à tailler, n'est pas la meilleure et qui dure le plus. Pour cette raison les Experts qui sont nommés pour apprécier les murs mitoyens, ne les estiment pas ce qu'ils ont coûté à faire : Mais après avoir appris par les baux à loyer le temps qu'il y a que les murs sont faits, ils déduisent du prix qu'ils ont coûté, autant de quatre-vingtièmes parties qu'il y a d'années que le mur est achevé, et n'en font payer que ce qui reste de toute la somme, leur avis étant qu'ils ne peuvent pas durer plus que quatre-vingt ans."*²

Ce savoir-faire de la construction, transmis et amélioré de génération en génération, inclut non pas uniquement des procédés de transformation des matériaux et de mise en œuvre mais également des principes constructifs à respecter pour éviter des dégradations prématurées. Les ponts en bois couverts ainsi que les bâtiments avec des avant-toits importants sont témoins de ce type de préoccupation.

Depuis plusieurs décennies, l'étude des défauts de la construction ainsi que le comportement des matériaux face aux intempéries se fait de manière plus systématique. Motivées par la constatation de dégâts répétés et systématiques, ces recherches se concentrent en général sur une seule famille de matériaux. Ainsi les campagnes de restauration d'édifices historiques ont donné lieu à des recherches sur la pathologie des pierres naturelles. Des dégradations survenues sur des ouvrages en béton ont incité à mieux comprendre le comportement de cette "pierre moderne" face au gel, aux sels et aux intempéries. L'utilisation à grande échelle de l'acier et d'autres métaux dans la construction a nécessité d'approfondir les connaissances sur les

¹Perrault (1684), Ed. Margada 1979, livre I, chapitre III, section 2, p.16.

²Perrault (1684), Ed. Margada 1979, livre II, chapitre VIII, p.46.

phénomènes de corrosion.

L'acquisition de ces connaissances a permis d'améliorer les produits, d'établir des exigences de qualité minimales et de définir des procédures normalisées pour vérifier ces exigences. Ces critères de qualité répondent souvent à un domaine d'application spécifique aux produits. Ainsi on va mesurer la résistance à l'usure mécanique d'un revêtement de sol, la résistance aux impacts des lès d'étanchéité etc.

Une estimation calculée ou une justification d'une durée de vie est toutefois rarement exigée. Les indications concernant les durées de vie de bâtiments ou de construction se font selon l'expérience des professionnels ou d'après le bon sens. Ainsi on conseille de rafraîchir les revêtements de murs d'un logement après 10 ans, de repeindre les fenêtres en bois après 5 à 10 ans, de remplacer les installations sanitaires après 20 à 25 ans et ainsi de suite³.

Aujourd'hui, les attentes fondamentales n'ont pas tellement changé par rapports aux constructions primitives. Les bâtiments doivent toujours constituer un abri durable construit avec des moyens financiers donnés tout en respectant encore d'autres exigences humaines (voir aussi tableau 2.1, page 14).

Le souci des maîtres d'ouvrage et des architectes pour choisir des matériaux durables n'a pas échappé à certains fabricants de produits modernes. Ainsi, ils ont dérivé les noms de leurs marques de mots que l'on associe facilement au critères de durabilité. ETERNIT tire son nom du mot latin AETERNUM ce qui signifie éternel ou impérissable⁴, les plaques PERFECTA renvoient à la perfection et DURISOL à la dureté tandis que les crépis MARMORAN et GRANOSIT font référence à l'indestructibilité des pierres.

Ce qui différencie les constructions modernes des anciennes sont les exigences et la complexité de la construction. En effet, d'une part un ouvrage moderne doit répondre à une multitude de normes et de règles et d'autre part, la gamme de matériaux et les techniques de construction disponibles se sont largement étendues. Depuis l'introduction des matières synthétiques dans la construction après la deuxième guerre mondiale, le nombre de produits mis sur le marché a énormément augmenté et continue toujours à grandir. Les produits existants sont améliorés et modifiés. La complexité des techniques a conduit à une spécialisation des maîtres d'état et des planificateurs. La réalisation d'une construction est l'œuvre d'une multitude d'entreprises et de personnes qui doivent connaître les exigences demandées, et leurs interventions doivent être coordonnées.

2.1.1 Approche performantielle

Pour répondre à cette complexification, le secteur du bâtiment doit aujourd'hui, comme tous les secteurs économiques, développer des analyses et démarches systémiques. Blachère avec son livre BÂTIR en 1969 et la création de la CIB WORKING COMMISSION W060 - THE PERFORMANCE CONCEPT IN BUILDING en 1970 sont les premières tentatives pour trouver des réponses à ces nouvelles problématiques. Cette démarche est reprise en 2001 par la Commission Européenne et conduit à la création d'un RÉSEAU D'APPROCHES PERFORMANTIELLES DE LA CONSTRUCTION le PEBBU-NETWORK⁵.

L'approche par les performances permet également de répondre aux nouvelles exigences du développement durable. A ce sujet, Hovde (2004) met en évidence deux aspects⁶ :

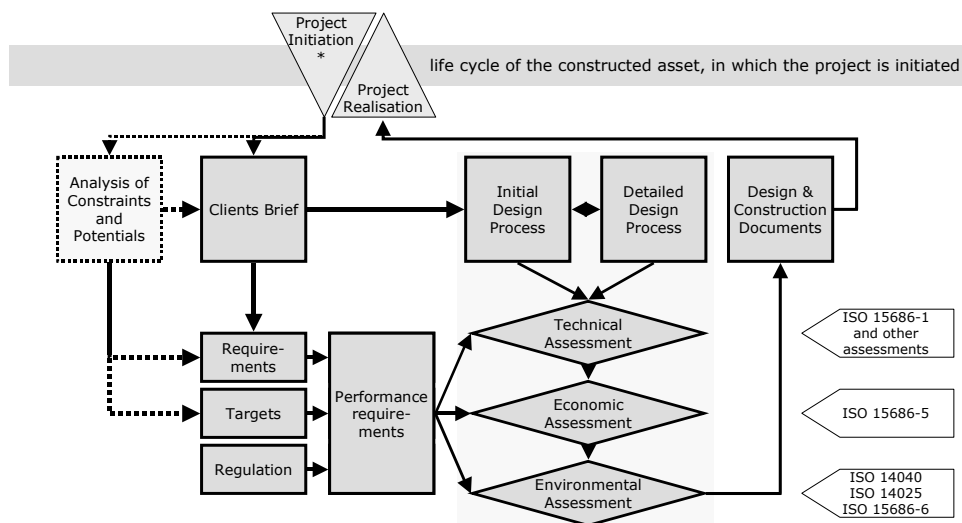
- *Les enjeux environnementaux* : Le secteur du bâtiment et de la construction, étant un grand consommateur de ressources matérielles et énergétiques, doit, à l'avenir, gérer ces dernières de manière efficace.

³ Arlt et Pfeiffer (2005) présentent ce type de durées de vie pour divers composants d'un bâtiment de logement. Les données ont été établies d'après un sondage effectué auprès d'entreprises (tableau 2) ou sont issues d'autres recherches (tableau 1).

⁴ Site Internet www.eternit.ch.

⁵ PeBBu : Performance Based Building Network.

⁶ Hovde et Moser (2004), p.11.



* Project may be initiated at any point in the life cycle of the building

FIG. 2.3 – Procedure ISO 15686-6 intégrée dans la planification de projets
(source : Trinius, 2005, Figure 1)

- *Les enjeux économiques* : Les coûts annuels pour la gestion et la maintenance du parc immobilier sont d'une grande importance non seulement pour les propriétaires mais pour l'économie d'un pays entier. Ils influencent notamment le maintien voir le développement de la compétitivité des secteurs de production et des services.

Selon le rapport CIB-W060 (1982), *"l'approche par la performance est d'abord et avant tout une pratique de pensée et de travail en termes d'objectifs plutôt qu'en termes de moyens. Elle définit ce qu'un bâtiment ou un composant de bâtiment est supposé faire au lieu de prescrire comment le construire."*⁷

Cette *approche performantielle* englobe divers aspects et thèmes en phase de planification. La figure 2.4 illustre ces différentes parties ainsi que les relations entre elles. On peut y voir que la prévision de la durée de vie est un des aspects clés dans cette approche. Ainsi il est inévitable que la question de la durabilité des bâtiments et de leurs composants devienne aussi un sujet d'actualité.

Pour tenir compte de ces enjeux, des exigences de durabilité précises seront introduites à l'avenir dans les cahiers de charges de bâtiments. Ceci constitue une contrainte supplémentaire à respecter lors de l'élaboration de projets de construction ou de transformation. Dorénavant, les planificateurs auront besoin de méthodes et d'outils leur permettant de valider leurs propositions et choix par rapport aux critères de durée de vie. Ces méthodes et outils n'existent pas à l'heure actuelle et leur développement nécessite un gros effort d'investissement. C'est pourquoi nous assistons, depuis quelques années, à l'émergence de divers projets de recherche tentant d'aborder la question de la dégradation des matériaux de construction de manière plus globale. Ceci dans le but de pouvoir fournir des indications de durée de vie pour des éléments de construction et des bâtiments entiers. Une des grandes difficultés que ces recherches rencontrent consiste en un manque de données homogènes concernant à la fois les actions agissant sur les constructions et le comportement des matériaux face à ces actions.

Actions

⁷CIB/W060 (1982), p.4, traduction par l'auteur

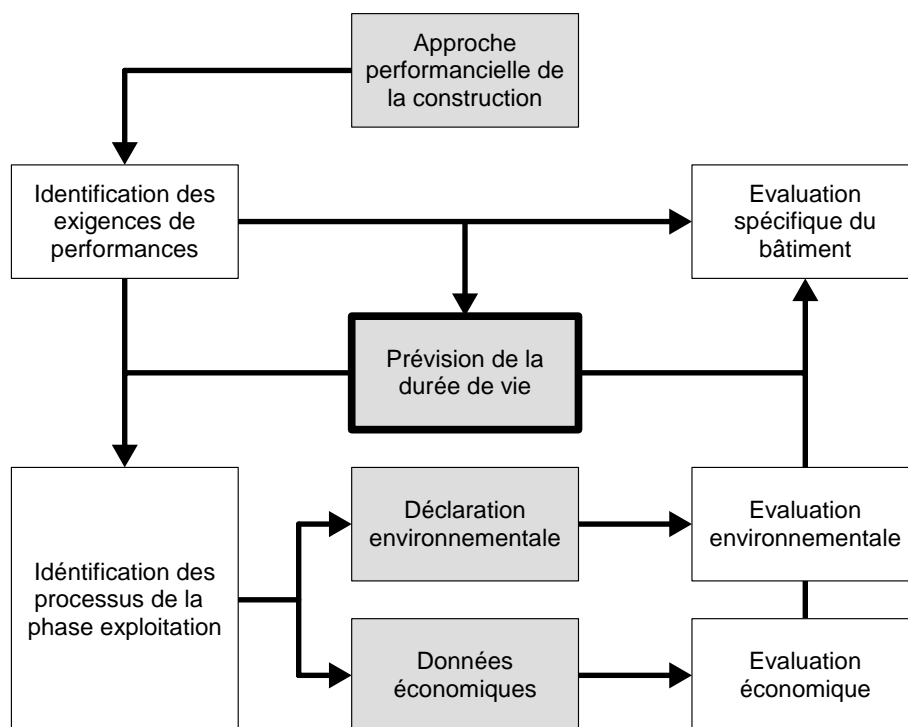


FIG. 2.4 – Interdépendance entre l’approche performantielle de la construction, la prévision de la durée de vie, déclaration et évaluation environnementale (source : Sjöström et al. - 2005)

Bien que les services météorologiques enregistrent une multitude de données climatiques depuis des décennies (température, humidité relative, vent, précipitations etc.), il apparaît difficile d’extraire de cette quantité énorme de données les caractéristiques essentielles pour l’altération des matériaux. Il y a également d’autres facteurs liés à l’activité humaine tels que l’usure induite par la circulation ou des coups provoqués par la chute d’objets, dont on doit tenir compte et sur lesquels très peu de données sont disponibles. Daniotti et al. (2008a) remarquent à ce sujet : *”Des informations ne sont pas disponibles, ni concernant des valeurs critiques ni concernant la fréquence d’évènements critiques. Dans cette situation, l’étude des conditions environnementales afin de pouvoir reproduire des conditions de vieillissement ”typiques” pourrait être une première analyse à faire.”*⁸

Matériaux

Alors que certaines familles de matériaux ont fait l’objet de nombreuses recherches, d’autres sont encore bien peu connues. Aussi, les données disponibles liées aux dégradations sont presque toujours spécifiques à un groupe de matériaux. Il manque des données uniformisées pour l’ensemble des matériaux de construction. Celles-ci sont pourtant nécessaires pour le développement d’outils de prédiction de durée de vie incluant une large gamme de matériaux de construction et d’éléments de construction.

Le manque de ce type de données constitue également un obstacle majeur pour la mise en application de la méthode présentée dans ce rapport. Toutefois les principes et relations mis en évidence dans cette recherche pourraient servir à orienter de futures investigations dans le but de combler ces lacunes.

Exigences d'habitabilité psycho-physiologiques	
Acoustique	Respect des niveaux sonores maximaux
Hygrothermique	Climat intérieur confortable (température, humidité, courants d'air)
Pureté d'air	La qualité de l'air doit respecter certains critères notamment quant à la présence de : poussières, gaz, microorganismes ou odeurs
Eclairage	luminance min., luminance max, Contrastes de luminances, stabilité de la luminance, spectre de la luminance, obscurité nécessaire au sommeil
Espace intérieur	Appréciation de l'espace (dimensions, proportions, couleurs, éclairage, mobilier, relation avec les autres espaces)
Perception du monde extérieur	Avoir une possibilité de voir l'environnement extérieur
Esthétique d'aspect	Expression de l'aspect (planéité, grain des surfaces, l'aplomb, l'équerrage, la rectitude des lignes et angles)
Irradiation et d'ensoleillement	Lumière naturelle
Sécurité	Protection contre des atteintes à la vie et aux biens (non-effondrement, intrusions humaines, intrusions animales, incendie, risques d'accidents)
Facilités d'accès depuis la voie publique	Accès aisé depuis les voies publiques dans des conditions de sécurité identiques à celles des circulations intérieures
Exigences d'habitabilité sociologique	
Intimité	Intimité des familles et intimité des individus
Appropriation	Privacité de l'espace
Adaptation au mode de vie	
Equipement	Equipements vitaux (Sanitaires, chauffage, éclairage, électricité)
Hygiène	Salubrité des espaces
Exigences économiques	
DURABILITÉ	Satisfaction des autres exigences pendant une durée normale malgré un vieillissement normal et avec un entretien normal
Prix	Le prix de construction et la dépense d'entretien doivent être dans un rapport convenable avec la qualité de la construction

TAB. 2.1 – Exigences humaines citées par Blachère (1969)

2.1.2 Définition de la durabilité

Après une présentation des différentes exigences que doit remplir un bâtiment (voir tableau 2.1), Blachère (1969) définit la durabilité comme suit : *”Des diverses exigences que nous formulons à l’égard de nos bâtiments, la durabilité, qui est une exigence de nature économique, est l’une de celles qui ont des conséquences*

⁸Daniotti et al. (2008a), 11dbmc T32-195 : No information is available concerning neither critical thresholds values nor frequency of critical events. In this case studying the environmental conditions in order to reproduce a “typical” ageing condition could be a first analysis tool.

les plus importantes.”⁹ Il poursuit avec sa définition : ”Elle s’exprime ainsi : toutes les exigences humaines doivent être satisfaites pendant n années, les conditions naturelles étant normales, l’entretien étant assuré, l’occupation étant normale, certaines parties de la construction étant changées tous les p années, si cela a été prévu.”

La norme ISO 15686-1 (2000) définit la notion *Durabilité* comme l’*aptitude d’un bâtiment ou de ses parties à remplir sa fonction, pendant un laps de temps donné, sous l’influence d’agents prévisibles lors de son utilisation.*

Dans les deux définitions on peut retrouver les mêmes trois critères :

1. L’objet doit satisfaire des exigences humaines ou, autrement dit, remplir une fonction.
2. L’objet est soumis à des sollicitations normales ou prévisibles.
3. La notion de la durée pendant laquelle l’objet doit remplir le point 1.

2.1.3 Obsolescences

D’après la définition de Blachère, qui relie la durabilité à la *satisfaction des exigences humaines* (voir tableau 2.1), on peut s’interroger sur la nature des exigences humaines ou sur les origines de *non-satisfaction*. Iselin (1996) explique ceci par une évolution divergente entre, *d’une part l’objet architectural, l’espace architectonique ou l’environnement et, d’autre part, l’utilisateur.*¹⁰ De l’inadéquation entre ces quatre facteurs résulte l’obsolescence de l’objet.

Une analyse de ces processus le conduit à distinguer entre les 5 types d’*obsolescence* suivants :

- **Obsolescence matérielle ou physique**

L’*obsolescence matérielle ou physique* est une défaillance technique dû à la dégradation de la matière. Cette détérioration apparaît généralement lentement lorsque l’objet est exposé aux conditions d’utilisation normales. Ce sont les caractéristiques des matériaux, leur mise en œuvre ainsi que les sollicitations auxquelles l’objet est soumis qui déterminent son altération et, par conséquent, le moment de son obsolescence. On parle alors de *vieillesse* ou *dégradation naturelle*. Dans d’autres cas, lors d’événements exceptionnels et heureusement assez rares tels que les incendies, les tremblements de terre etc., la *dégradation est instantanée ou accidentelle*. Dans ces cas, les sollicitations atteignent ou dépassent les limites des matériaux, ce qui provoque des dégâts irréversibles.

- **Obsolescence technique**

L’*obsolescence technique* est une incapacité de remplir les mêmes exigences techniques que des produits récents. En effet, depuis le milieu du XXe siècle, le développement technologique s’est accéléré mettant sur le marché des nouveautés de plus en plus performantes. Cette évolution est beaucoup plus rapide que le cycle normal de la régénération des bâtiments et la différence entre les performances d’un objet ”en place” et celles des nouveaux produits devient très vite importante. Ceci bien avant l’obsolescence matérielle de l’objet. Le progrès de la technologie des fenêtres démontre bien cette évolution. Dans l’espace de quelques dizaines d’années, les déperditions thermiques des fenêtres neuves se sont améliorées d’un facteur 2 à 3. Ainsi des fenêtres âgées de 30 ans, bien qu’en bon état, sont aujourd’hui devenues obsolètes. Pour ce type d’obsolescence, König et al. (2009) distinguent en plus entre l’*obsolescence technique* proprement dite et l’*obsolescence légale* (legale Obsoleszenz). Cette dernière étant introduite pour mettre en évidence le rôle des exigences légales de plus en plus sévères provoquant ainsi la désuétude de bâtiments ou parties de bâtiments existants. Etant donné que ces exigences légales concernent, dans presque tous les cas, des exigences techniques telles que l’isolation thermique minimale, l’isolation phonique minimale etc., leur

⁹Blachère (1969), Chapitre XI - Considérations générales sur l’exigence de durabilité, p.141

¹⁰Iselin (1996), paragraphe 5.1.4 Obsolescence, p.182.

non-respect peut également être considéré étant une forme particulière de l'*obsolescence technique*.

- **Obsolescence économique**

L'*obsolescence économique* est une perte de rentabilité économique de l'objet. Ceci devient le cas lorsque les coûts d'exploitation ne sont plus en rapport avec les revenus exploitables. Comme pour l'obsolescence technique, le progrès des fenêtres peut être cité à titre d'exemple. Les coûts d'énergie liés aux pertes thermiques par des anciennes fenêtres pesant aujourd'hui sur la rentabilité économique d'un bâtiment. Dans d'autres cas, lorsque le rendement d'un bâtiment existant ne peut plus être mis en adéquation avec l'augmentation de la valeur du terrain, la décision de démolition est également prise pour des raisons économiques¹¹.

- **Obsolescence psychologique**

L'*obsolescence psychologique* ou l'*obsolescence formelle*¹² est la *perte de la conformité d'un objet aux critères de style, de mode ou de goût émergent du contexte socioculturel*¹³. Ce type d'obsolescence est étroitement lié au rôle représentatif d'un bâtiment et dépend souvent de critères subjectifs. Toutefois, lorsque l'aspect se dégrade suite à un processus normal de vieillissement on est plutôt dans le cas d'une *obsolescence matérielle*.

- **Obsolescence fonctionnelle et organisationnelle**

L'*obsolescence fonctionnelle et organisationnelle* apparaît lorsqu'il y inadéquation entre les fonctions attendues et les possibilités offertes par l'objet. Pour un bâtiment, ce type d'obsolescence apparaît lorsque l'affectation est modifiée et que les espaces ou les éléments en place ne conviennent pas aux nouveaux besoins.

La norme ISO 15686-1 décrit des types similaires d'obsolescence¹⁴

Parmi ces 5 types d'obsolescence, seul l'*obsolescence matérielle ou physique* obéit à des règles des sciences naturelles (physique, chimie etc.). Les 4 autres types résultent d'un changement d'exigences influencé par des facteurs sociaux, économiques ou politiques. Dans ces cas, la durabilité ne dépend pas de la capacité de la matière à résister aux influences extérieures mais plutôt d'un potentiel à s'adapter à des conditions d'utilisation modifiées. L'*obsolescence matérielle ou physique* constitue également une limite absolue, non franchissable de la durabilité. Ceci dit, une obsolescence matérielle conduit automatiquement à une obsolescence technique, économique, fonctionnelle ou psychologique, ce qui n'est pas le cas dans l'autre sens car les autres types d'obsolescences peuvent être atteints sans que l'objet soit matériellement défaillant.

L'obsolescence conduit également à une perte de valeur, c.-à-d. perte de valeur matérielle, technique, fonctionnelle, esthétique, économique, émotionnelle ou autre. Ainsi, l'objet ayant perdu toute valeur est considérée en fin de vie.

2.1.4 Double sens du mot "durable"

Depuis une quinzaine d'années, le terme *durabilité* ou *durable* est également utilisé dans le monde francophone pour désigner des caractéristiques en relation des objectifs du *développement durable*. Dans cette définition, le caractère *durable* ne se limite pas uniquement à un comportement ou à une utilisation de l'objet mais également à sa capacité d'influencer le futur développement de son environnement. Cette confusion entre ces deux significations a été évitée dans d'autres langues. En allemand, par exemple, on distingue entre *dauerhaftig* et *nachhaltig*, en anglais entre *durable* et *sustainable*.

¹¹König et al. (2009), p.32 - Ökonomische Obsoleszenz.

¹²La notion de *Formale Obsoleszenz* est utilisé par König et al., 2009, p.32.

¹³Idem.

¹⁴ISO 15686-1 (2000), paragraphe 11 Obsolescence, flexibilité et réutilisation.

Dans le présent rapport, nous utilisons le terme *durabilité* dans le premier sens tel que définit par Blachère ou la norme ISO 15686.

2.1.5 Durée de vie

Dans le paragraphe 2.1.2 nous avons défini la *durabilité* comme étant la caractéristique d'un composant à remplir des *fonctions* pendant un *laps de temps* donné tout en étant soumis à des *agents*. Bien qu'il y ait dans ce terme aussi la notion du temps, il s'agit là plutôt d'une définition générique ne permettant pas l'attribution d'une valeur numérique. Toutefois, lorsqu'on souhaite chiffrer cette *durabilité*, on indique la durée du *laps de temps* pendant lequel le composant est fonctionnel. Cette durée, que l'on nomme *durée de vie*, est exprimée généralement en années¹⁵.

Pour différencier la durabilité maximale, limitée par une obsolescence matérielle due au vieillissement, de la durabilité effective tenant compte d'autres facteurs, la littérature distingue aussi entre *durée d'utilisation*¹⁶ et *durée de vie*¹⁷. Alors que la *durée d'utilisation* désigne une période pendant laquelle un bâtiment ou un composant *est utilisé*, la *durée de vie* décrit une période pendant laquelle ces derniers *pourraient être utilisés*, c.-à.-d une durée pendant laquelle ils sont matériellement aptes au service. Dans ce sens, la *durée de vie* peut être considérée comme étant la durabilité d'un objet déterminé uniquement par son *obsolescence matérielle et physique*.

Différents types de durée de vie sont définis par la norme ISO 15686-1 et décrit au chapitre 44.

2.2 Littérature concernant les matériaux de construction

La connaissance et les recherches dans le domaine des dégradations de matériaux de construction sont très vastes et hétérogènes. Elles couvrent un large éventail de matériaux et des investigations effectuées sur plusieurs dizaines d'années dans le monde entier.

Historiquement on peut observer un grand effort de recherche à partir les années 1950. Ceci est sûrement induit par l'apparition, à cette époque, de nouveaux matériaux et méthodes de construction. Les techniques naissantes ne sont pas toujours maîtrisées avec succès et de nombreuses erreurs sont commises, aussi bien dans la planification des ouvrages que lors de leur mise en œuvre. Ces erreurs conduisent à plus ou moins longue échéance à l'apparition de dégâts et à la défaillance prématurée des ouvrages. Pour comprendre les phénomènes en jeu ainsi que pour éviter la répétition de ces défauts, de nombreuses investigations sont alors entreprises et documentées dans divers écrits. On trouve les résultats de ces recherches dans des articles scientifiques ou de manière condensée et vulgarisée dans des traités de pathologies écrits à l'attention de constructeurs et planificateurs.

Un aperçu des cette documentation est donné au chapitre 2.2.2. Cette documentation, toujours grandissante, constitue aujourd'hui la base du savoir concernant les propriétés et le comportement des matériaux de construction.

2.2.1 Publications scientifiques

Les publications scientifiques relatant les expériences et recherches dans le domaine de la durabilité des matériaux sont nombreuses. Comme il est de coutume, ces articles sont publiés dans des revues spécialisées

¹⁵Hovde et Moser (2004), p.17 citent la norme canadienne CSA 478 :95 dans laquelle la relation entre durée de vie et durabilité est aussi décrite comme suit : *Requirements for durability are expressed in terms of design service life*.

¹⁶En anglais *use life*, en allemand *Nutzungsdauer*.

¹⁷En anglais *service life*, en allemand *Lebensdauer*.

et des actes de conférence.

Conférences

La conférence la plus importante dans ce domaine est la conférence DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS (dbmc). Organisée pour la première fois en 1978, cette conférence internationale a eu lieu tous les 3 ans depuis. Les actes publiés à l'occasion de ces manifestations sont énumérés dans l'annexe D - tableau D.2.

D'autres conférences, notamment la CIB WORLD CONFÉRENCE ou des conférences dédiées à des familles de matériaux comme l'acier ou le béton armé, traitent également des aspects de durabilité.

Revues

La revue DURABILITY OF BUILDING MATERIALS, éditée par Elsevier, était une autre plate-forme pour diffuser des résultats de recherche dans le domaine des matériaux. Cette édition a malheureusement été arrêtée en 1987 après seulement 5 ans d'existence.

De nombreux autres articles ont été publiés dans des revues spécialisées dans le domaine de l'ingénierie.

2.2.2 Traités de pathologies

Une grande partie des recherches mentionnées ci-dessus a été entreprise suite à l'apparition systématique de certains dégâts sur des ouvrages. Pour faire profiter un large public de ce savoir-faire accumulé pendant des années, plusieurs experts ont publié des livres traitant de la pathologie dans le domaine de la construction. Ces livres s'adressent en grande partie aux architectes ou à d'autres acteurs de la construction. Leur objectif est de constituer le savoir-faire nécessaire à la conception et à la mise en œuvre correcte de bâtiments ou autres constructions. En respectant les *règles de l'art* prescrites dans ces ouvrages, le planificateur ou l'exécutant est sensé éviter les erreurs pouvant mener à la défaillance prématurée des éléments.

De manière générale, ces ouvrages expliquent le pourquoi et le comment de pathologies tout en donnant des règles à suivre pour les éviter. Ils ont souvent aussi une structure similaire. D'abord, une première partie théorique décrit des phénomènes d'altération de manière qualitative. Dans cette partie, les différentes conditions et processus qui entrent en jeu et peuvent mener à l'apparition de défauts sont mis en évidence. Cette théorie est presque toujours accompagnée d'exemples d'applications tirés de cas concrets. Les exemples montrent, soit des manières exemplaires de faire, soit des erreurs ayant conduit à la ruine de l'élément.

A titre d'exemple voici une sélection d'ouvrages ou séries d'écrits traitant de la pathologie dans le domaine de la construction :

Le DIGESTS DE LA CONSTRUCTION AU CANADA édité de 1961 à 1987 par le Centre National de Recherche Canadian (CNRC) - Division des recherches en bâtiment constitue une série de 250 articles concernant divers thèmes liés à la construction, la physique du bâtiment ou la durabilité des matériaux. Estimant que la plupart des sujets traités sont toujours d'actualité, le CNRC a numérisé ces documents pour les rendre accessibles sur son site Internet¹⁸. Toutes les questions liées à la construction y sont abordées de manière simple et claire dont aussi des problématiques de pathologie ou de durabilité.

Le TITRE III - LA SCIENCE DE LA DURABILITÉ du livre BÂTIR de Blachère (1969) ne traite pas vraiment les pathologies mais constitue plutôt une première approche à une *science de la durabilité*. Différents phénomènes physiques et chimiques influençant la durabilité d'un matériau sont décrits de manière succincte.

¹⁸Site CNRC : www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc.

Le livre de Offenstein (1988) COMPATIBLES, INCOMPATIBLES OU COMMENT ASSOCIER LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, également destiné aux architectes et constructeurs, aborde la question de l'altération en étudiant les réactions provoquées par la combinaison de divers matériaux. Après la présentation des différents phénomènes d'altération par familles de matériaux de construction, les différentes incompatibilités entre les divers matériaux sont énumérées et approfondies. Les incompatibilités sont classées d'une part d'après leur importance (esthétique, de résolution facile ou destructive) et d'autre part d'après leur nature d'action (mécanique, physique ou chimique).

Après un premier ouvrage en 4 volumes, intitulé MATERIALS FOR BUILDING et publié entre 1972 et 1976, Addleson édite en 1991 avec Rice le livre PERFORMANCE OF MATERIALS IN BUILDINGS, A STUDY OF THE PRINCIPLES AND AGENCIES OF CHANGE. Dans ces traités, de nombreux mécanismes de détérioration sont décrits et mis en relation avec les agents responsables de ces phénomènes.

L'ouvrage de Blaich (1999) LA DÉTÉRIORATION DES BÂTIMENTS, ANALYSE ET PRÉVENTION, destiné aux architectes et constructeurs, a pour objectif de *"de diffuser le savoir que l'EMPA a acquis jusqu'à ce jour à propos du mécanisme des défauts constatés dans d'importants secteurs de la construction des bâtiments, et d'indiquer les mesures à prendre pour les prévenir."*¹⁹ Le savoir et les exemples décrits sont issus de nombreuses expertises concernant des cas de détériorations prématurées que l'équipe de l'EMPA a effectué sur de longues années. Classé par élément de construction, le livre donne des explications quant au fonctionnement de divers systèmes constructifs ainsi que des règles de mise en œuvre à respecter. À l'aide d'exemples concrets, des cas de dégradations prématurées sont présentés tout en précisant l'origine du défaut et des mesures à prendre pour éviter de répéter les mêmes erreurs.

La collection SCHADENFREIES BAUEN, éditée depuis 1992 par la maison Fraunhofer IRB Verlag constitue également une série d'ouvrages de référence traitant des défauts de la construction. Organisés selon les cas par matériau ou par élément de construction, les divers volumes traitent en détail une thématique spécifique.²⁰

L'étude de ces ouvrages donne un bon aperçu de la complexité du sujet. La variété des phénomènes d'altération est aussi grande que la diversité des matériaux de construction ou la multitude des applications de ces derniers. Certains livres tentent d'aborder la question de manière globale, alors que d'autres se limitent à une famille de matériaux ou à une catégorie d'éléments de construction pour la traiter en profondeur.

L'étude de ces documents met aussi en évidence que le savoir-faire et les connaissances en pathologies dans le domaine de la construction sont, aujourd'hui encore, plutôt un savoir qualitatif et rarement quantitatif. L'objectif prioritaire est d'éviter des erreurs de construction ainsi que des défaillances prématurées qui en découlent. Il s'agit alors d'assurer une durée de vie "convenable" aux divers éléments composant un ouvrage et non d'une véritable planification ou gestion de durée de vie d'un bâtiment.

2.2.3 Normes

Un autre type d'écrits contenant des informations concernant la durabilité de matériaux de construction sont des normes nationales et internationales. Pour certains matériaux, on peut y trouver la description de procédures d'essais qui simulent des actions intervenant dans la dégradation et le vieillissement ainsi que des valeurs chiffrées de certaines caractéristiques.

Procédures d'essais

La définition de procédures d'essais par des normes sert à spécifier les conditions ainsi que le déroulement de l'épreuve.

Avant tout, ce type d'essai est utilisé pour vérifier la qualité et le respect de caractéristiques par rapport à des

¹⁹Blaich (1999), Avant-propos p.1.

²⁰Une liste des volumes se trouve en annexe D.3.

valeurs minimales de produits destinés au marché de la construction. C'est pourquoi ces essais ne sont pas toujours conçus pour déterminer une caractéristique chiffrée mais souvent juste pour vérifier des exigences normatives.

2.3 Méthodes d'estimation de la durée de vie

Trois approches

Selon la norme canadienne CSA 478-95 - *Guideline on durability in buildings*²¹, l'estimation des durées de vie de composants ou assemblages peut être effectuée selon une ou plusieurs des trois approches suivantes :

- (a) par comparaison,
- (b) par modélisation du processus de détérioration,
- (c) par des essais de vieillissement.

La première approche, par *comparaison* (a), consiste à estimer la durée de vie sur la base de références connues, c.-à.-d. par comparaison avec des constructions équivalentes utilisées dans des conditions similaires. Les *méthodes statistiques*, décrites au paragraphe 2.3.1, peuvent être mises dans cette catégorie. Elles établissent des relations entre l'âge et la chance de survie d'un élément à l'aide de données statistiques récoltées sur le terrain.

L'*Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets* (AMDE) (paragraphe 2.3.4), la méthode des *Limites de Performances* (PLM) (paragraphe 2.3.5) ainsi que la méthode selon la *chaîne de Markov* (paragraphe 2.3.6) sont des exemples typiques de prévision par *modélisation* du processus de détérioration (b) à l'aide d'outils informatiques. La méthode présentée dans ce rapport en fait également partie.

Quelques recherches utilisant la dernière approche (c), par *essais de vieillissement*, sont résumées au paragraphe 2.3.7.

Le document guide australien *Durability in Buildings* (ABCB, 2006) préconise de combiner les trois approches selon les situations :

- 1) *Enregistrements historiques*²² *Enregistrements historiques (Historical record) correspond à l'approche Par comparaison (demonstrated effectiveness) de la norme canadienne CSA 478-95 présentée plus haut. (a) : Cette méthode devrait être utilisée uniquement pour des composants ou assemblages identiques qui ont été utilisés avec succès dans un environnement similaire.*
- 2) *Modélisation (b) et enregistrements historiques (a) : Cette méthode devrait être utilisée pour des composants ou assemblages similaires qui ont été utilisés avec succès dans le même environnement ou pour des composants ou assemblages éprouvés, installés dans un environnement légèrement différent.*
- 3) *Modélisation (b) et essais (c) : Cette méthode devrait être utilisée pour des composants ou assemblages innovants ou pour des composants ou assemblages éprouvés, installés dans des environnements significativement différents. Si des normes internationales sont disponibles, les essais devraient être exécutés selon elles.*²³

Commission internationale CIB W080

Actuellement, les recherches internationales sont coordonnées par la commission CIB W080 PREDICTION OF SERVICE LIFE OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS. Son objectif et son domaine d'action sont décrits ainsi : "La commission considère la prévision de la durée de vie de matériaux et composants de construction par l'identification et le développement systématique de méthodes et domaines pour améliorer des méthodes existantes, par la recommandation de nouvelles méthodologies et par l'information sur l'état de l'art.

²¹ Cité par Hovde et Moser (2004), p.25.

²² L'approche

²³ ABCB (2006), paragraphe 4.3.2 Methods of assessment, p.12, trad. de l'auteur.

Il est envisagé que la recherche sur la durée de vie et la durabilité sera rendue accessible via Internet. Des documents guides seront aussi préparés pour faciliter l'utilisation de différentes méthodes de prévision de la durée de vie, y compris la Méthode Factorielle, des Méthodes Stochastiques et l'Approche par la Fiabilité. Enfin, des concepts en lien avec des fonctions de défaillance, de réponse à la dose et d'évolution de performance ainsi que leur interdépendance seront esquissés.”²⁴

Pour couvrir les trois types d'approche décrite par la norme canadienne citées ci-dessus, la commission W080 est composée de trois groupes de travail :

- WG1 - Outils informatiques de prévision de durée de vie (ICT tools in Service Life Prediction)
- WG2 - Collecte de données concernant la durée de vie (Service Life Data Collection)
- WG3 - Méthodes de test pour la prévision de la durée de vie (Test Methods for Service Life Prediction)

Parmi les principales actions de la commission W080, on peut citer l'édition de plusieurs rapports d'état de l'art. Ces documents, énumérés dans l'annexe D.1, couvrent les diverses approches et donnent un très bon aperçu des différentes recherches menées et en cours dans le domaine de la prévision de la durée de vie. Une partie des méthodes présentées dans ce chapitre est également présentée dans ces rapports.

2.3.1 Méthodes statistiques

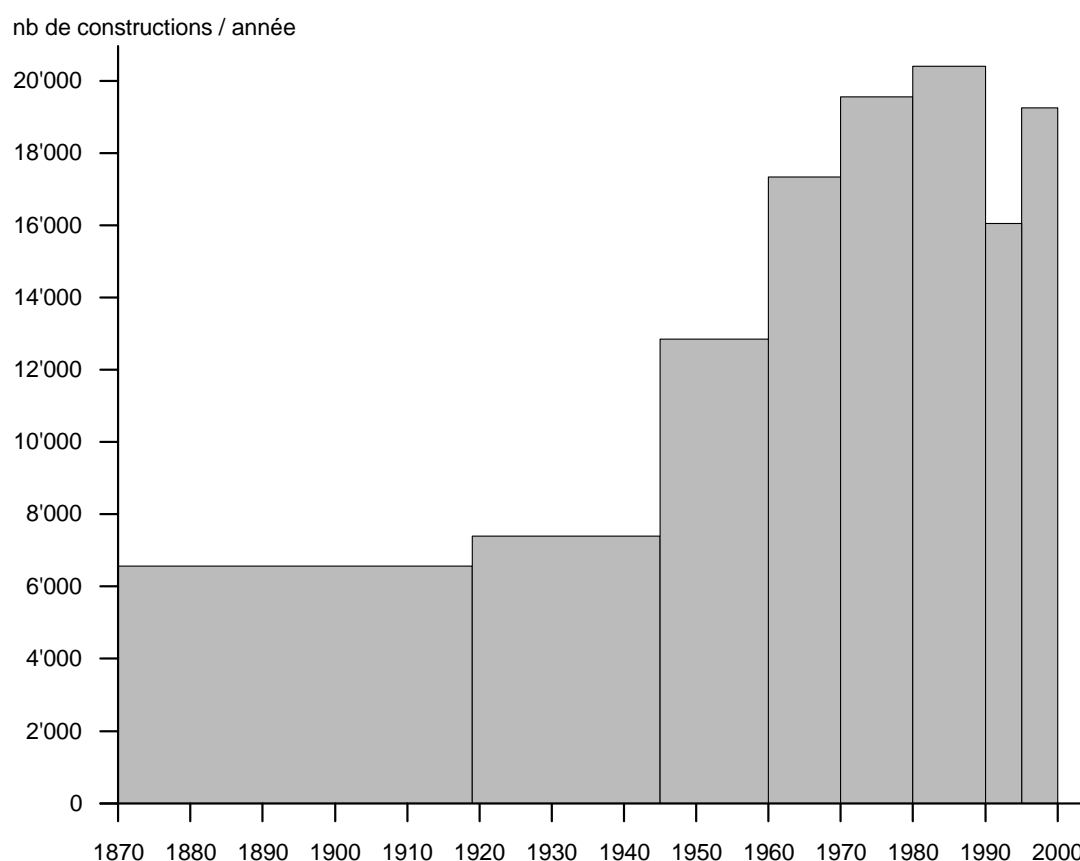


FIG. 2.5 – Parc immobilier Suisse
Bâtiments par époque de construction²⁵

Durant la période d'après guerre, l'intensité des constructions a fortement augmenté pour constituer un important parc immobilier (voir figure 35). Environ 30 ans plus tard, soit à partir de 1980, ce parc immobilier

²⁴De www.cibworld.nl - database : commissions ; commission : W080, trad par l'auteur.

²⁵Source des données OFS - www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/09/02/blank/key/gebaeude/bauperiode.html.

commence à vieillir et les premières réalisations doivent être assainies. Pour planifier et gérer ces interventions coûteuses et difficilement prévisibles, les propriétaires ont besoin de méthodes et d'outils rapides et faciles d'utilisation. Le développement de la méthode MERIP et de son successeur, la méthode EPIQR, sont le fruit de recherches dont le but était de répondre à cette problématique. En même temps et dans le même souci de prévoir les futures interventions sur des bâtiments existants, la question de la durée de vie des bâtiments et de ces composants surgit. Pour répondre à cette question, les premières approches récoltent des données statistiques concernant la durée de vie des différents composants. Ceci dans le but de développer des outils permettant une planification des interventions à long terme et une gestion globale des investissements de maintien en état d'un parc immobilier.

Schröder (1989) présente un modèle mathématique permettant de décrire la dévalorisation des éléments de construction en fonction du temps (voir figure 2.6). Il est basé sur une relation entre valeur (W) et temps (t) séparée en deux phases (phases 1 et 2). Les fonctions de dévalorisation des deux parties peuvent être définies de manière indépendante en choisissant librement le point de changement de phase (\bar{u}) ainsi que les exposants a des deux parties. Ceci permet de tenir compte d'un changement de comportement au vieillissement à partir d'un certain stade de dégradation ($W_{\bar{u}}$).

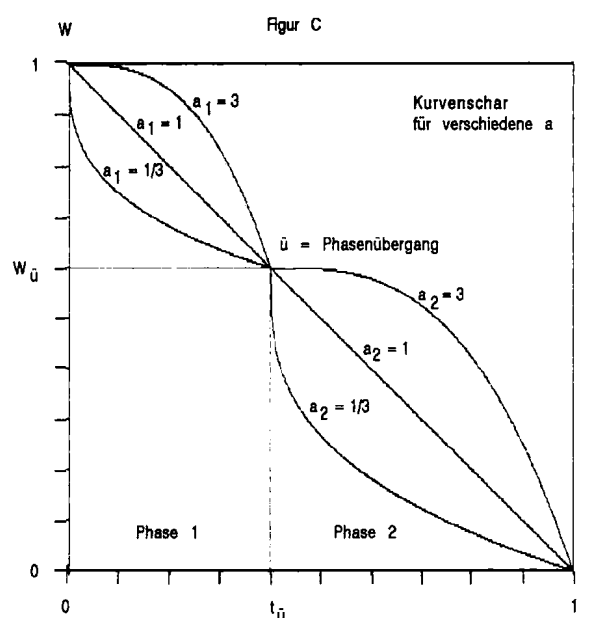


FIG. 2.6 – Courbes pour différents exposants a dans les formules de dévalorisation
(source : Schröder, 1989, Bild 4)

Les rapports IP Bau (1994) et Balaras (2005) présentent deux exemples d'application de ce modèle. Dans le rapport IP BAU, différents éléments de construction sont analysés à partir de données statistiques. Ce travail présente l'âge des éléments lorsque l'on a procédé à leur remplacement (Ersatzzeitpunkt). Il est intéressant d'observer que, selon l'époque de construction, ces courbes varient fortement (voir figure 2.7).

Il est toutefois important de remarquer que les données déterminées de cette façon correspondent, selon nos définitions, plutôt à la durée d'utilisation. Ceci car on comptabilise tous les éléments remplacés sans se préoccuper de la raison de leur obsolescence.

Ces types de données statistiques sont aujourd'hui aussi utilisés dans le cadre d'Analyses de Cycle de Vie (ACV)²⁶.

²⁶König et al. (2009), p.30.

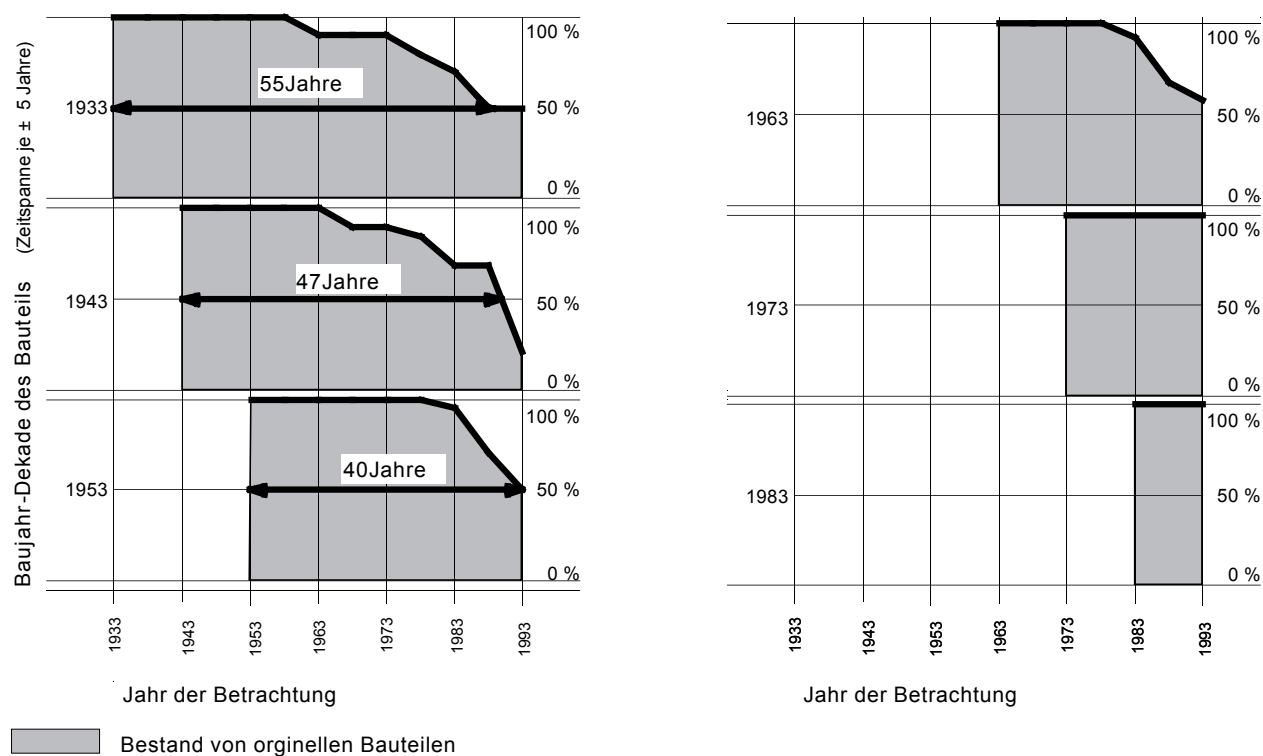


FIG. 2.7 – Moment de remplacement : Fenêtres
(source : IP Bau, 1994, p.49, Grafik 3.18)

Un inconvénient majeur des méthodes statistiques consiste dans le fait que, pour obtenir des données statistiques concernant le remplacement ou la défaillance d'un nouveau système constructif ou d'un matériau, il faudra attendre une, voire plusieurs dizaines d'années. Ceci n'est pas acceptable si l'on désire planifier la construction d'un bâtiment selon une approche performantielle²⁷. Dans ce cas, il est impératif de pouvoir prédire la durée de vie des composants non pas uniquement pour des systèmes constructifs éprouvés pendant des dizaines d'années mais également pour des constructions nouvelles pour lesquelles on n'a pas le recul nécessaire. C'est pourquoi il est important de disposer d'autres méthodes ou modèles pour estimer les durées de vie des composants.

2.3.2 Planification de la durée de vie

La série de normes ISO 15686 - BÂTIMENTS ET BIENS IMMOBILIERS CONSTRUITS - PRÉVISION DE LA DURÉE DE VIE définit des principes et démarches permettant d'intégrer la planification de la durabilité d'un bâtiment ou de ses différentes parties dans la phase de conception. Le titre anglais SERVICE LIFE PLANNING est dans ce sens plus explicite car il intègre aussi la notion de planification. Dans la partie 1, l'expression *Prévision de la durée de vie* est définie comme : "Élaboration du programme et de la conception du bâtiment et de ses parties pour atteindre la durée de vie au stade de la conception, par exemple afin de réduire les coûts afférents à la propriété d'un bâtiment et de faciliter l'entretien et la réhabilitation."²⁸

Le niveau de connaissances dans le domaine de la durabilité n'étant pas suffisant pour proposer des procédures ou techniques concrètes de prédiction, la série de normes 15686 a comme rôle d'établir des principes généraux permettant d'orienter et d'harmoniser les recherches à effectuer dans ce domaine.

²⁷Voir paragraphe 2.1.1.

²⁸ISO 15686-1 (2000), p.2, art. 3.1.7.

Partie	Titre	Publication
1	Principes généraux	2000
2	Procédures pour la prévision de la durée de vie	2001
3	Audits et revues des performances	2002
4	Exigences des données	
5	Approche en coût global	2008
6	Procédés pour la considération d'effets sur l'environnement	2005
7	Évaluation de la performance de l'information en retour relative à la durée de vie, issue de la pratique	2006
8	Durée de vie documentée et estimation de la durée de vie	2008
9	Lignes directrices pour l'évaluation des données relatives à la durée de vie	2008
10	When to assess functional performance	2009

TAB. 2.2 – Les 10 parties de la norme ISO 15686 traitant de la prévision de la durée de vie

Le tableau 2.2 récapitule les 10 parties dont la série ISO 15686 est composée actuellement.

La partie 1 Principes généraux, décrit les principes et les procédures qui s'appliquent à la conception lors de la prévision de la durée de vie de bâtiments et de biens immobiliers construits. Il est important que la phase de conception prenne systématiquement en compte les conditions locales afin de garantir, avec un degré élevé de probabilité, que la durée de vie ne sera pas plus courte que la durée de vie à la conception. La norme est applicable à la fois aux constructions neuves et à la réhabilitation de structures existantes²⁹. La figure 2.8, tirée de ISO 15686-1, illustre la procédure à suivre lors de la conception d'une prévision de durée de vie.

La partie 2 de l'ISO 15686 décrit une méthodologie générale relative aux essais de performance dans le temps des composants et assemblages afin de prévoir la durée de vie. Dans la mesure du possible, il convient de déduire la durée de vie de référence utilisée pour établir une durée de vie estimée des prévisions de durée de vie décrites dans la partie 2. Cette partie peut également donner certaines indications sur les valeurs à attribuer aux facteurs. On prévoit que les spécialistes des matériaux et les laboratoires d'essai qui ont besoin d'interpréter ou de concevoir des essais de performances seront les principaux utilisateurs de la partie 2.³⁰

La partie 3 Audits et revues des performances décrit l'approche et la procédure à appliquer pour le préprogramme, le programme de conception, la construction et, le cas échéant, la gestion de la durée de vie et la destruction des bâtiments et des biens immobiliers construits pour assurer que les mesures nécessaires pour obtenir les performances dans le temps seront mises en oeuvre.³¹

La partie 4 de l'ISO 15686 décrit les exigences concernant les données qui permettront de déterminer la durée de vie.

La partie 5 de l'ISO 15686 fournit un guide d'évaluation des coûts de la durée de vie d'un bâtiment.³²

la partie 6 - Procédés pour la considération d'effets sur l'environnement - décrit comment évaluer, pendant la phase de conception, les impacts environnementaux potentiels de diverses conceptions de biens immobiliers construits. Elle fournit des informations sur l'interface entre l'évaluation du cycle de vie et la prévision de la durée de vie (SLP).³³

²⁹ISO 15686-1 (2000), p.1.

³⁰Idem, p. vii.

³¹Idem, p. vii.

³²Idem, p. vii.

³³Lacasse, M.A. et Sjöström, C. (2005), traduit par l'auteur.

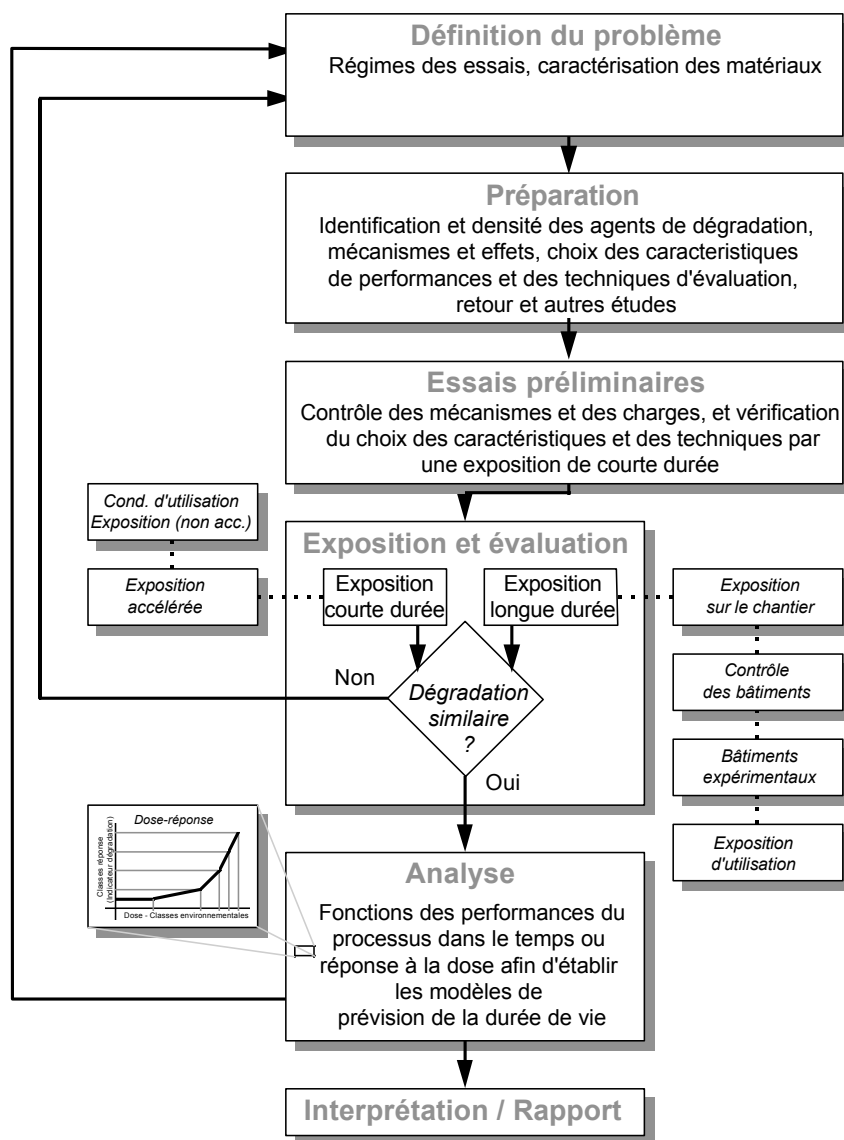


FIG. 2.8 – Méthodologie systématique pour prévoir la durée de vie des composants de bâtiment
(source ISO 15686-1 :2000, fig. 4, extraite de l'ISO 15686-2 :2001)

Définition de la *Prévision de la durée de vie* : élaboration du programme et de la conception du bâtiment et de ses parties pour atteindre la durée de vie au stade de la conception, par exemple afin de réduire les coûts afférents à la propriété d'un bâtiment et de faciliter l'entretien et la réhabilitation³⁴

ISO 15686 Partie 1 - Principes généraux

La partie 1 de la norme ISO 15686 décrit les principes généraux de la prévision de la durée de vie des bâtiments et des biens immobiliers construits.

Elle introduit plusieurs types de *durée de vie* dont les relations sont représentées dans la figure 2.9.

Durée de vie à la conception - DL

Le premier type de durée de vie est la *durée de vie à la conception* (Design Life - DL). Elle correspond à l'objectif de durabilité pour un bâtiment ou un composant. Le rôle des planificateurs est alors de concevoir les composants de telle façon que cet objectif puisse être atteint. La norme distingue entre la *durée de vie à*

³⁴ISO 15686-1 (2000), p.2, art. 3.1.7.

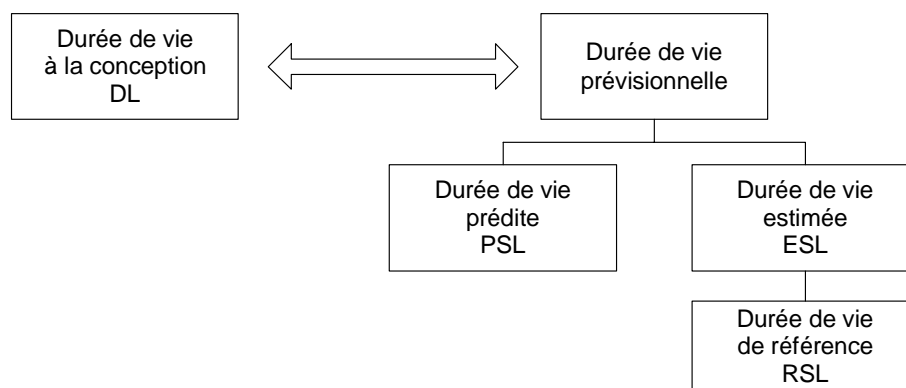


FIG. 2.9 – Relation des différentes durées de vie

la conception du bâtiment (Design Life Building - DLB) et la durée de vie à la conception d'un composant (Design Life Component - DLC).

La durée de vie d'un composant (DLC) peut être inférieure à la durée de vie du bâtiment (DLB). Dans ce cas, elle doit être en relation raisonnable avec la durée de vie du bâtiment (DLB) ainsi qu'aux coûts liés à sa première mise en œuvre et à son remplacement durant la vie du bâtiment.

Le tableau 2.3, présente des suggestions de durées de vie minimales pour différentes catégories de composants en fonction de la durée de vie du bâtiment.

Durée de vie à la conception du bâtiment (DLB)	Composants inaccessibles ou de structure	Composants dont le remplacement est coûteux ou difficile (y compris les systèmes souterrains d'évacuation et de drainage)	Composants principaux remplaçables	Les services du bâtiment
illimitée	illimitée	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

NOTE 1 Les composants aisément remplacés peuvent avoir des durées de vie de 3 ans ou 6 ans.

NOTE 2 Il convient d'utiliser exceptionnellement une durée de vie illimitée car cela réduit sensiblement les options de conception.

TAB. 2.3 – Suggestions de durées de vie minimales pour les composants (DLC)

Source : ISO 15686 :1 Tab 1

Durée de vie prévisionnelle

Pour pouvoir justifier que les choix constructifs correspondent aux objectifs de *durée de vie à la conception*, la norme introduit la notion de *durée de vie prévisionnelle*. Cette durée représente une durée pouvant être prévue par les méthodes et connaissances actuelles en tenant compte des caractéristiques spécifiques des solutions choisies. Elle peut être obtenue de deux manières, soit par prédiction en déterminant la *durée de vie prédite*, soit par estimation en calculant la *durée de vie estimée*.

Durée de vie prédite - PSL

Une première façon de vérifier la durée de vie d'un bâtiment ou d'un composant consiste à déterminer la *durée de vie prédite* (Predicted Service Live - PSL). Ceci se fait par comparaison avec des cas similaires observés antérieurement ou sur la base d'essais de vieillissement.

Durée de vie estimée - ESL

La deuxième manière de vérifier la durée de vie consiste à calculer la *durée de vie estimée* (Estimated Service Life - ESL). Cette estimation tient compte non seulement des caractéristiques matérielles du composant mais aussi des conditions d'utilisation et d'environnement spécifiques.

Durée de vie de référence ou Durée de vie documentée - RSL

Pour estimer la durée de vie selon la méthode décrite dans la norme, la notion de *durée de vie de référence* (Reference Service Life - RSL) a été introduite. Elle correspond à une durée de vie attendue pour un bâtiment ou de ses différentes parties dans des conditions de conception, d'utilisation ou d'exposition de référence. Dans la *Méthode factorielle*, décrite au chapitre suivant, la durée de vie est estimée à partir de la *durée de vie de référence*.

2.3.3 Méthode factorielle

La *Méthode factorielle*³⁵ est une méthode définie dans le paragraphe 9 de la norme ISO 15686-1 pour estimer la durée de vie de composants de construction.

Cette méthode propose la détermination d'une *durée de vie estimée* (ESL) d'un composant à partir d'une *durée de vie de référence* (RSL), corrigée par sept *facteurs modifiants* permettant de tenir compte des variations possibles des conditions de vieillissement.

La formule suivante décrit le principe du calcul :

$$ESL = RSL \times f_A \times f_B \times f_C \times f_D \times f_E \times f_F \times f_G \quad (2.1)$$

L'introduction de ces facteurs permet de rallonger ou de raccourcir la *durée de vie de référence* lorsque les conditions réelles d'application divergent des conditions de référence. Dans les conditions de référence, les facteurs modifiants sont égaux à 1. Des valeurs inférieures correspondent à des conditions plus sévères alors que des valeurs supérieures reflètent des conditions plus favorables que les conditions de références. La signification des sept facteurs modifiants est décrite dans le tableau 2.4.

Agents		Conditions à prendre en compte (exemples)	
Agent correspondant aux caractéristiques de qualité inhérentes	f_A	Qualité des composants (quality of components)	Fabrication, stockage, transport, matériaux, revêtements de protection (appliqués en usine)
	f_B	Niveau conception (design level)	Incorporation, protection par le reste de la structure
	f_C	Niveau réalisation des travaux (work execution level)	Gestion du chantier, niveau d'exécution, conditions climatiques pendant la réalisation des travaux
Environnement	f_D	Environnement intérieur (indoor environment)	Agressivité de l'environnement, ventilation, condensation
	f_E	Environnement extérieur (outdoor environment)	Hauteur du bâtiment, conditions micro-environnementales, émissions de la circulation, facteurs atmosphériques
Conditions de fonctionnement	f_F	Conditions d'utilisation (in-use conditions)	Choc mécanique, catégorie d'utilisateurs, usure par détérioration naturelle
	f_G	Niveau entretien (maintenance level)	Qualité et fréquence de l'entretien, accessibilité pour l'entretien

TAB. 2.4 – Signification des *Facteurs modifiants* (source ISO15686-1, Tab E.1)

Basée sur cette méthode, une multitude de recherches, a fait l'objet de nombreuses publications. Ces travaux tentent d'appliquer la méthode factorielle à différents cas d'étude.

³⁵En anglais *Factor Method*.

D'après les publications, on peut distinguer deux types de recherche :

- des programmes de recherche travaillant sur des matériaux ou des composants de construction. A partir de campagnes d'essais et de mesures, ils essaient de déterminer la durée de vie de référence et/ou le poids des facteurs modifiants.
- des études plus théoriques, essayant d'établir des modèles mathématiques ou des méthodes plus nuancées que la méthode factorielle (enhanced factor method)

Daniotti et Lupica Spagnolo (2008) précisent que, même si la Méthode Factorielle est une méthode très simple pour estimer la durée de vie, elle doit tenir compte de phénomènes aléatoires tel que les sollicitations météorologiques. C'est pourquoi les scientifiques ont démontré que l'amélioration de la méthode peut se faire de deux manières :

- la première introduit une approche probabiliste dans laquelle les *facteurs modifiants* sont exprimés en tant que variables aléatoires. Utiliser l'équation (2.1) avec un algorithme aléatoire, permet d'obtenir une estimation de la durée de vie en forme de densité de probabilité³⁶.
- le deuxième procédé d'amélioration consiste en la création de grilles d'évaluation. L'utilisateur choisit des caractéristiques dans une grille. Les *facteurs modifiants* sont alors déterminés de manière automatique à partir de cette grille. La subjectivité des facteurs, introduite au moment de la création de la grille, peut alors être minimisée lorsque des experts définissent les relations entre des paramètres d'exposition, d'exécution etc. et les *facteurs modifiants* ($f_A \dots f_G$). Ainsi même des personnes non expérimentées peuvent utiliser la méthode.

Le projet d'une plate-forme de planification de la durée de vie (www.durée-de-vie-batiment.fr - Hans et al., 2008), élaboré par la *Division Environnement* du CSTB, a regroupé les deux façons de faire en un seul outil. D'abord, l'utilisateur définit dans une grille les différents attributs et conditions pour chaque facteur. Ensuite, il choisit entre plusieurs types de distributions aléatoires des facteurs pour le calcul.

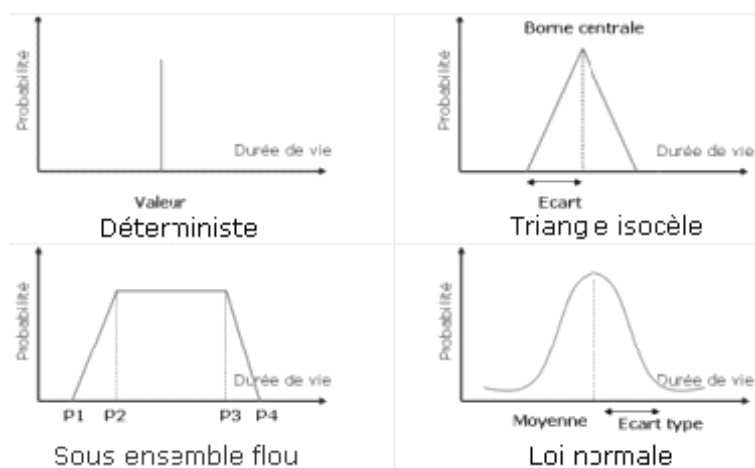


FIG. 2.10 – Formats de données de durée de vie (source : Hans et al., 2008)

La figure 2.11 illustre la grille d'un mur en maçonnerie élaborée pour le projet français susmentionné. Issu du même projet, la figure 2.10 montre les différents choix de distributions aléatoires.

³⁶C'est le même type de procédé aléatoire utilisé dans notre démarche et présenté au chapitre 4.4.

Facteurs		Critères	Niveaux								
A	Qualité des composants	Marquage	Marquage CE				Marque volontaire NF				
		largeur des briques en mm	[300, 375[[375, 450]		> 450		
		Résistance à la compression R en N/mm² (ou MPa)	[4;6[[6;8[[8;10]		>10		
		Compatibilité mortier/ brique	mise en oeuvre avec un le mortier préconisé par le fournisseur des briques				utilisation d'un mortier non préconisé par le fournisseur des briques				
		parement intérieur	enduit		revêtement rapporté			pas de parement intérieur			
		type de parement extérieur	enduit		bardage rapporté			revêtement extérieur collé			
		Type d'enduit	OC1		OC2			OC3			
		Type de support	Rt 3				Rt 2				
B	Niveau de conception	types de joints verticaux	Absence de joint			gorges à mortier remplies		encollage sur toute la largeur			
		conception des chaînages verticaux	Absence de chaînage			sans briques accessoires		avec briques accessoires			
		conception des chaînages horizontaux	Absence de chaînage			sans briques accessoires		avec briques accessoires			
		types d'abouts de plancher : Planelle terre cuite	NON				OUI				
		Planelle terre cuite doublée d'un isolant	NON				OUI				
		pose des menuiseries	en feuillure au nu intérieur			en tunnel		en feuillure avec ébrasement			
		soubassements	plancher sur terre plein			plancher sur vide sanitaire avec soubassement en Monomur		plancher sur vide sanitaire avec soubassement autre que Monomur			
		calepinage vertical	linteau sans arase		linteau sur arase		plancher sur arase		plancher sans arase		
		Type d'arase	Béton			Brique + Béton		Brique			
		conception des réseaux - Saignées verticales	profondeur <= 30 mm et largeur <= 200 mm				profondeur <= 80 mm et largeur <= 120 mm				
C	Niveau réalisation des travaux	Qualification de l'entreprise qui réalise les travaux	Auto-construction			Poseur non formé à la pose à joint mince		Poseur formé à la pose à joint mince			
		contrôle exécution	auto-contrôle				contrôle par une tierce personne				
D	Environnement intérieur	Locaux chauffés	NON				OUI				
		Taux d'hygrométrie	forte			moyenne		faible			
		Ventilation du local	NON				OUI				
E	Environnement extérieur	zone sismique	0		Ia		Ib		II		III
		Effets de site	Site protégé			Site normal			Site exposé		
		Exposition de la façade considérée	Non abritée				Abrisée				
		zone climatique	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3	
		pluviométrie du site	forte (>1200mm/an)			moyenne (entre 500 et 1200mm/an)			faible (<500mm/an)		
F	Condition d'utilisation	« qualité » des interventions pratiquées après la réalisation du bâtiment	intervention par un professionnel			intervention par un particulier avec les outils adaptés		intervention par un particulier sans outils adaptés			
		Destination du bâtiment	Habitation individuelle diffuse		Habitation individuelle groupée	Logement collectif		Bureaux et activités		Etablissement recevant du public	
		Mode d'usage	Risque de chocs			Risque d'humidification			Pas de risque particulier		
		Destination du local	Pièces humides						Pièces sèches (chambres- bureaux)		
G	Niveau entretien	Conditions d'entretien	Sans entretien								

FIG. 2.11 – Grille d'évaluation de EVA-Perfs (source : www.eva.perfs.fr)

2.3.4 Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)³⁷ est une méthode pour l'analyse des risques de défaillance développée et utilisée dans les années soixante dans le secteur aéronautique. Etant donné le grand nombre de composants pouvant potentiellement causer la défaillance d'un avion moderne, elle était conçue comme une aide pour assurer un niveau adéquat de fiabilité des systèmes. Une AMDE peut fournir des informations destinées à corriger la conception tout comme la planification de la maintenance. Aujourd'hui cette méthode est aussi employée par les industries spatiales, nucléaires, chimiques et automobiles (Talon et al., 2006).

Le principe de la méthode est de déterminer, pour un système, tous les scénarii de défaillances possibles tout en attribuant à chaque scénario une probabilité. Dans les domaines spatiaux, aéronautiques etc. dont les pièces mécaniques sont souvent sollicitées d'une manière proche de leur limite de résistance, cela permet d'éviter des ruptures de fatigue indésirables qui peuvent provoquer des accidents souvent catastrophiques. L'AMDE permet également de planifier les contrôles et entretiens périodiques sur les engins pour remplacer régulièrement les pièces les plus critiques. Dans le domaine de la construction, cette méthode a été adaptée pour effectuer des analyses de risque ainsi que pour l'évaluation de la durée de vie de composants de bâtiment. Le rapport CIB 310 - FAILURE MODES EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS, RESEARCH FOR AND APPLICATION TO THE BUILDING, DOMAIN - STATE OF THE ART REPORT (Talon et al., 2006) fournit un aperçu des recherches actuelles qui appliquent l'AMDE à des éléments de construction.

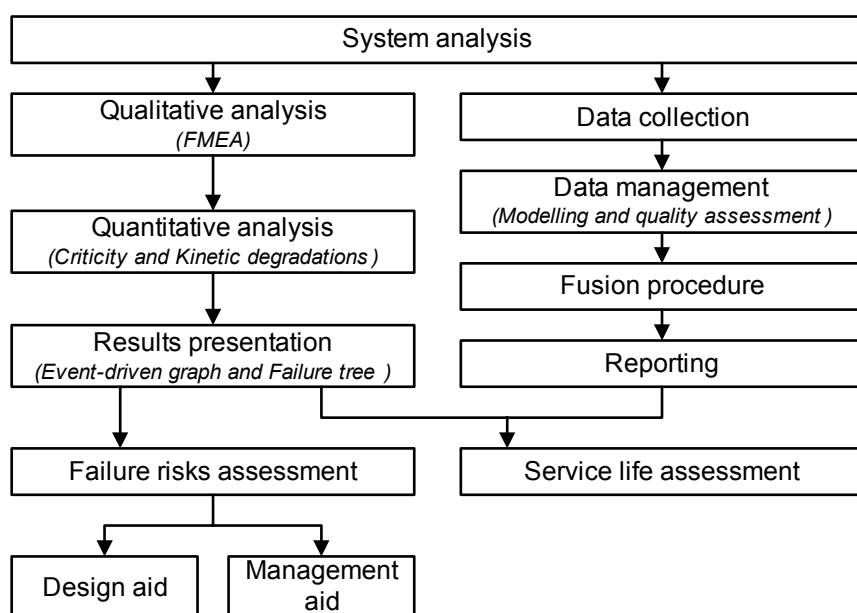


FIG. 2.12 – Approche du CSTB en vue d'une application de l'AMDE et AMDEC dans le domaine des bâtiments

(source Talon et al. 2006, p.2, figure 1)

L'approche du CSTB pour appliquer la méthode d'AMDE au domaine du bâtiment est résumée en figure 2.12.

L'application de cette méthode comporte plusieurs étapes :

1. Création d'un modèle structurel permettant de décrire le système étudié en détail. La figure 2.13 représente un modèle structurel pour un système de panneau solaire thermique.
2. A l'aide du modèle structurel, les différents scénarii de défaillance sont identifiés et mis en évidence. Les différents scénarii sont alors représentés sous forme de tables AMDE (figure 2.14) ou de graphes (figure 2.15).

³⁷ L'AMDE est plus connu sous sa dénomination anglophone *Failure Mode Effect Analysis* ou *FMEA*.

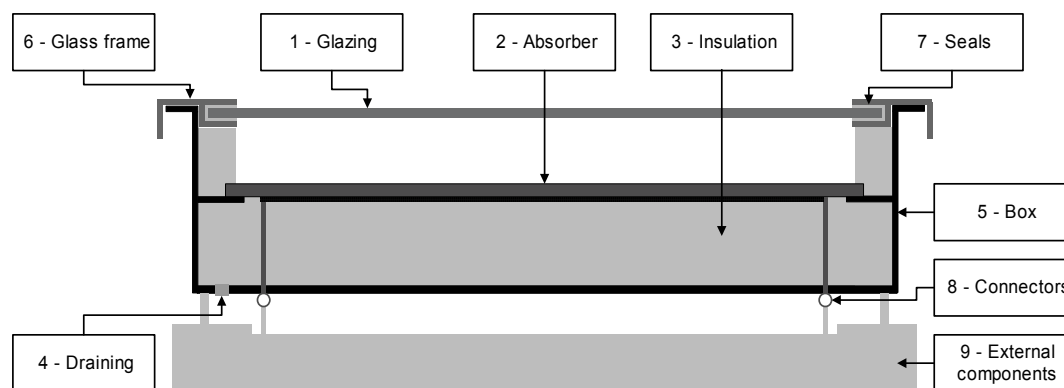


FIG. 2.13 – Décomposition structurelles d'un système de panneau solaire thermique
(source : Talon et al., 2004, figure 1)

3. L'analyse quantitative des divers scénarii, à l'aide de courbes de dégradations, permet d'estimer la vitesse de dégradation pour chaque phénomène ainsi que la détermination des moments de défaillance de l'élément étudié (figure 2.16)
4. pour chaque scénario les effets et conséquences sur le système sont étudiés (défaillance partielle ou totale).

Function	Component	Origin stage	End stage	Modes	Causes	Direct effects	Indirect effects
To be tight (liquid, vapour, gas, vegetation, vertebrate)	Seals	a.0	a.1	Surface degradation	Ultraviolet radiation	Surface disintegration	-----
		a.0	a.1	Ozone cracking	Ozone	Holing	-----
		a.1	a.2	Surface disintegration	Ultraviolet radiation	Holing	-----
		a.2	a.3	Holing	- Ozone cracking - Surface disintegration	Failure	Stresses of components in contact with inside environment by outside environmental agents
To be tight (liquid, vapour, gas, vegetation, vertebrate)	Glazing	b.0	b.1	Cracking	- Deviation of temperature between inside and outside environments (low temperature, hail, snow, rain) - Thermal shock - Schocks (vertebrate, hail) - Pressure - Wind	Glazing embrittlement	-----
		b.1	b.2	Breaking	Glazing embrittlement	Failure	Stresses of components in contact with inside environment by outside environmental agents
To absorb infrared radiation	Coating (absorber)	a.3 et b.2	c.4	Corrosion	- Seals : Infiltration of liquid - Seals : Infiltration of pollutants - Glazing : Infiltration of liquid - Glazing : Infiltration of pollutants	Holing	-----
		a.3 et b.2	c.4	Breaking	- Seals : Action of vertebrate - Seals : Action of hail - Glazing : Action of vertebrate - Glazing : Action of hail	Failure	-----
		c.4	c.5	Holing	Corrosion	Failure	-----

FIG. 2.14 – Extrait d'une table AMDE pour des panneaux solaires - Illustration du principe interactif où les effets directs ou indirects peuvent devenir des causes d'autres dégradations.

(source : Talon et al., 2004, table 2)

Cette méthode est en quelque sorte une modélisation très spécifique d'un composant de bâtiment, permettant son analyse en détail. On peut également imaginer que le système subit des entretiens ou des révisions au cours de sa durée de service. Dans ce cas, ce type de modèle devrait pouvoir permettre facilement la modification des paramètres en cours d'évaluation suivie de la réactualisation de graphe d'évènements.

Un deuxième point à soulever est que cette méthode permet de donner des informations concernant le type

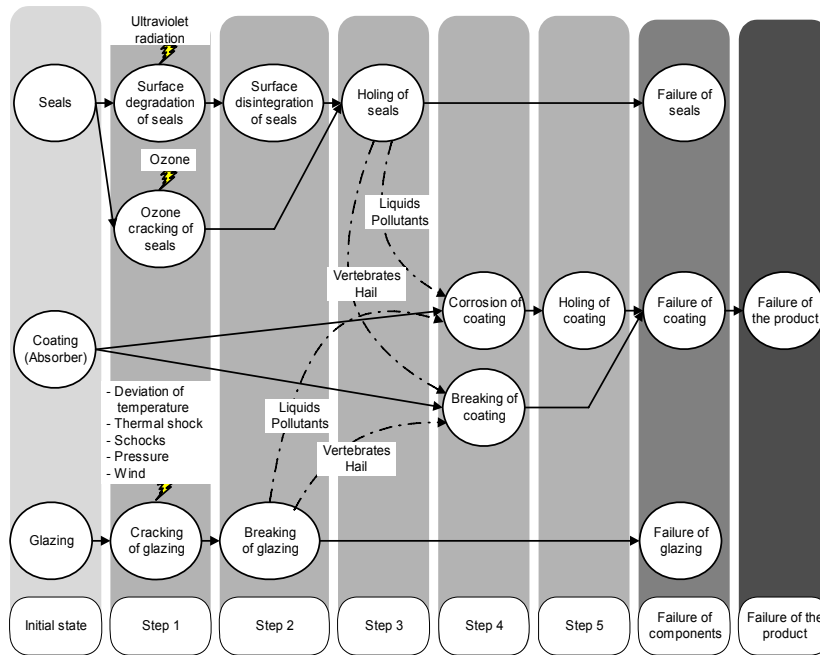


FIG. 2.15 – Extrait d'un graphe d'événements d'un panneau solaire - Représentation de la succession ou concomitance des dégradations des composants depuis l'état initial jusqu'à l'état de défaillance totale.
(source : Talon et al., 2004, figure 4)

de la défaillance. Ceci, mis en relation avec la fonction de l'élément, donne une indication de la gravité des dégâts et l'aptitude à remplir cette dernière.

Pour calculer la durée de vie d'un élément, il faut également connaître, pour chaque phénomène, la vitesse de dégradation par rapport à l'intensité de la cause. La durée de vie est alors, la durée du chemin critique, c.à.d. le chemin le plus court sur le graphe.

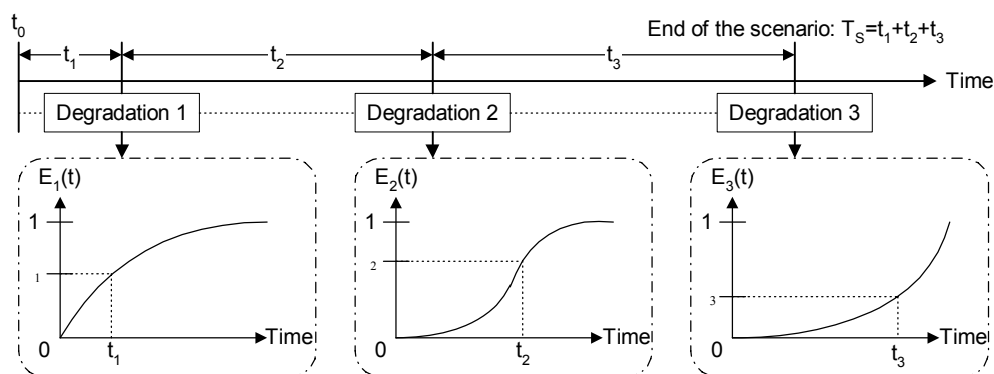


FIG. 2.16 – Principe d'évaluation de la durée des scénarii de dégradation
(source : Talon et al., 2005, figure 2)

Toutefois, le modèle ainsi que la liste des dégradations associées est très spécifique à une construction donnée. Des variations ne peuvent être faites que dans une moindre mesure p.ex. en choisissant d'autres matériaux dans la même famille. Pour d'autres constructions, le modèle et la table AMDE doivent être refaits en grande partie car les relations effets-causes ne sont pas forcément les mêmes. Pour développer des outils s'appliquant à une large gamme d'éléments, un grand nombre de modèles doit être construit au

préalable et intégré dans le programme.

Ce type d'analyse doit être refait pour chaque système. Pour le bâtiment cela veut dire, que chaque composant doit faire l'objet d'une analyse séparée car suivant le type de construction, les phénomènes, effets ou causes ne sont pas les mêmes.

Par rapport au travail présenté dans cette thèse, la méthode AMDE constitue une autre approche pour la même problématique. Elle a l'avantage de ne pas se limiter à des constructions multicouches mais nécessite, par contre, de traiter chaque type de composant séparément. Dans une vision globale d'estimation de la durée de vie de bâtiments ou de partie de bâtiments, les deux approches peuvent être complémentaires. Ayant besoin de données de bases similaires (vitesse de dégradation en fonction de l'intensité des sollicitations), elles pourraient également appuyer leurs calculs sur des sources communes.

2.3.5 La Méthode de Limites des Performances (PLM)

La Méthode de Limites des Performances (Performance Limits Method - PLM), développée par le Groupe de Recherche pour la Durabilité de Composants du Politecnico di Milano et présentée par Daniotti et Lupica Spagnolo (2008), consiste en une évaluation de la durabilité d'un composant par l'estimation de la dégradation des performances jusqu'à une limite d'acceptabilité.

La méthode est divisée en 5 étapes :

- *définition des objectifs de performance ;*
- *individualisation des exigences et spécifications des performances que le composant doit fournir ;*
- *conversion des spécifications de performance dans des caractéristiques fonctionnelles techniques ;*
- *individualisation des seuils de performance pour la durée de vie ;*
- *évaluation de la durée de vie.*

*L'analyse de la performance et du déclin fonctionnel est fondamentale pour modéliser le phénomène de dégradation via une relation d'enchaînement : p.ex. agents-actions-effets-dégradation.*³⁸

Le principe consistant à utiliser le critère de performance afin de déterminer la fin de vie d'un composant est également appliqué dans la méthode présentée dans cette thèse (voir paragraphe 3.4 *Durée de vie*).

2.3.6 Chaîne de Markov

Dans le domaine de la simulation numérique de processus dans le temps, le recours au principe de la *Chaîne de Markov* est très répandu. Ceci devient possible lorsque le *principe de Markov* est respecté c.-à-d., l'état futur $E(t + 1)$ doit pouvoir être décliné à partir de l'état présent $E(t)$ et être indépendant des états du passé $E(t - 1)$, $E(t - 2)$ etc. Pour pouvoir établir l'évolution d'un état dans le temps, il faut connaître les règles et les critères provoquant des changements d'état.

Pour la prédiction de la durée de vie d'éléments de construction certaines démarches ont également recours à cette méthode.³⁹

Ce principe de la *Chaîne de Markov* consistant à décliner le nouvel état $E(t + 1)$ seulement à partir de l'état présent E_t , présume que le système n'a pas de mémoire et n'agit uniquement que par rapport au moment présent. Dans le cas de vieillissement de matériaux, ce principe peut être admis car en général, les phénomènes de dégradation s'arrêtent lorsque les conditions d'exposition provoquant la détérioration ne sont plus réunies. On peut toutefois imaginer d'autres cas où la réaction continue, même lorsque les facteurs déclencheurs ont disparu. Dans ces cas il faudra aussi tenir compte d'un certain nombre d'états précédents. Cette configuration peut par exemple être rencontrée dans le cas d'incendies qui, une fois allumés, continuent par eux-mêmes. Le même type de réaction peut aussi être observé avec la pourriture de matériaux ligneux.

³⁸ Daniotti et Lupica Spagnolo (2008), 2.2 The Performance Limits Method (PLM), traduit de l'anglais par l'auteur.

³⁹ Voir Moser (2004), paragraphe 2.6.1 Markov model for the deterioration, p.69.

Lorsque l'apport d'eau est coupé, la dégradation continue tant que l'humidité du matériau est suffisante. La figure 2.17 illustre schématiquement cet effet de mémoire pour une contrainte s'arrêtant subitement.

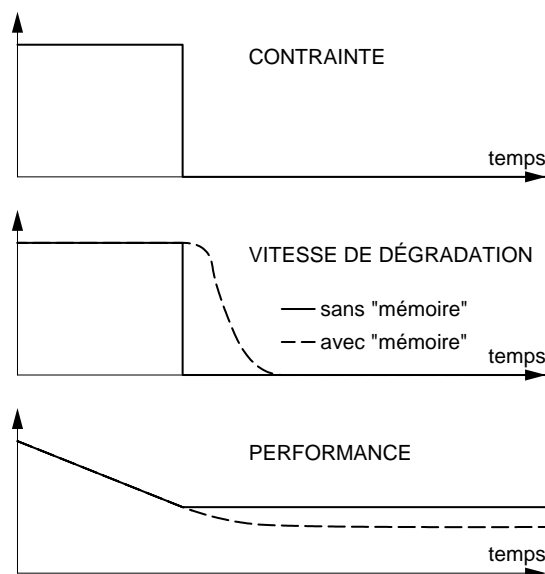


FIG. 2.17 – Différence entre système avec et sans "mémoire"

Dans les modèles de prédiction du vieillissement, les dégradations dues à un incendie ne sont en principe pas prises en compte car elles ne constituent pas un vieillissement naturel. Pour la pourriture, cette caractéristique de "mémoire" peut être négligée si la durée de l'effet retardataire est inférieure à la durée d'incrémentation du temps.

Condition Rating	Condition/State Description	Damage
1	Excellent	0-10%
2	Very Good	11-25%
3	Good	26-40%
4	Fair	41-55%
5	Poor	56-70%
6	Very Poor	71-85%
7	Failed	>85%

Table 1. Condition Assessment Scales (Modified from Lounis et al. 1998)

FIG. 2.18 – Echelle d'évaluation des conditions
(source : Zhang, 2005, Modified from Lounis et al. 1998)

Une application de cette méthode, pour déterminer le coût de maintenance de système de toitures, est présentée par Zhang et al. (2005). Dans cette étude, des *notes* (condition rating) sont introduites pour décrire l'état d'un élément de construction. Ses notes vont de "1", pour un état excellent, à "7", pour un état défaillant. (voir figure 2.18)

Dans une deuxième phase, il s'agit de connaître les règles qui permettent de savoir à quel moment ou dans quelles conditions l'état passe d'une note X à une note Y . Pour cette transition, des valeurs définissant la probabilité avec laquelle la note passe de i à $i + 1$, soit une dégradation d'une étape, ont été introduites. Ceci pour un intervalle de temps donné (voir figure 2.19).

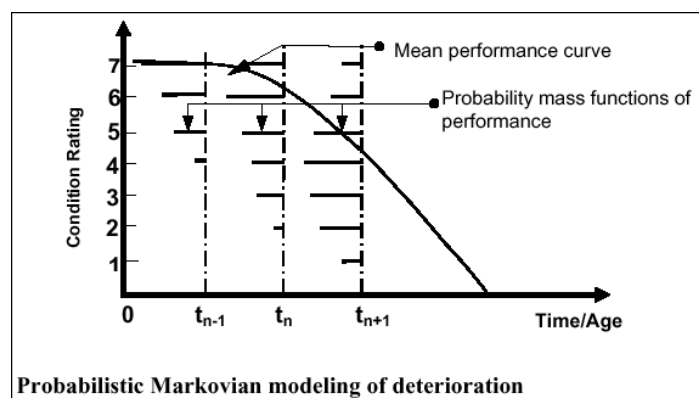


Figure B2.1: Markov deterioration function

FIG. 2.19 – Markov deterioration function
(source : Moser, 2004, p.69, fig. B21)

Avec un calcul itératif par incrémentation de temps on peut alors estimer la progression des notes au fils du temps et ainsi faire des prédictions sur la durée de vie de l'élément de construction.

Une des caractéristiques de cette méthode est qu'elle permet également d'introduire la notion de maintenance. Dans ce cas, lorsque l'état de l'élément de construction atteint un degré de vétusté défini par avance, on lui réattribue une note supérieure, ce qui revient à simuler sa remise en état. Le même procédé peut également se faire après un laps de temps donné pour introduire une maintenance préventive.

Mc Duling et al. (2008) proposent également une méthode basée sur des chaînes de Markov, mais en utilisant la logique floue⁴⁰ pour passer d'un état à l'autre. Pour déterminer les paramètres de calcul, ils se basent sur des expériences et des connaissances d'experts et, pour vérifier les calculs, sur des données récoltées sur le terrain.

2.3.7 Essais de vieillissement

Un moyen pour déterminer la durabilité de matériaux ou d'assemblages de matériaux consiste en l'analyse d'échantillons préalablement exposés à des sollicitations d'utilisation pendant une certaine durée. Cette méthode consistant à surveiller le vieillissement est fréquemment utilisée par l'industrie pour vérifier ou démontrer la résistance des produits face aux sollicitations attendues. De la même façon, des matériaux utilisés dans la construction sont également soumis à des tests de vieillissement. Etant donné que le but des fabricants effectuant de tels essais est, avant tout, de démontrer la fiabilité de leurs produits, ils se contentent souvent de justifier une durée de vie minimale sans préciser d'autres détails. Pour pouvoir faire des pronostics plus nuancés du vieillissement et ainsi estimer une durée de vie en fonction de différents paramètres, il est indispensable de connaître, du composant, sa perte de performance en fonction de l'intensité et de la durée d'exposition. Pour obtenir cette relation, aussi appelée *réponse à la dose*, il est nécessaire d'appliquer des types d'essai plus détaillés que ceux utilisés pour l'homologation de produits.

Le groupe de travail TEST METHODS FOR SERVICE LIFE PREDICTION (WG3) de la commission CIB W080 - PREDICTION OF SERVICE LIFE OF BUILDING COMPONENTS AND MATERIALS regroupe de chercheurs actifs dans le domaine de la mesure du vieillissement de matériaux et composants de construction. Daniotti et Re Cecconi (2010) résument dans un rapport sur l'état de l'art (CIB Publication 331) une dizaine de recherches traitant ce sujet.

⁴⁰en anglais : fuzzy logic.

Globalement on peut distinguer entre trois types de procédés pour mesurer le vieillissement de matériaux :

- le vieillissement naturel⁴¹
- l'analyse sur des bâtiments existants
- le vieillissement accéléré⁴²

Vieillissement naturel

Le *vieillissement naturel* est une première façon de tester les matériaux. Elle consiste à installer les échantillons dans des situations réelles et à les exposer aux intempéries naturelles.

Pour ce type d'essai, le nombre d'échantillons peut être considérable car il augmente de manière exponentielle avec le nombre de paramètres. Il dépend :

- du nombre d'examen destructifs que l'on souhaite effectuer,
- de la fréquence de ces examens,
- de la durée totale de l'essai,
- du nombre de matériaux que l'on souhaite tester et
- du nombre de conditions différentes d'exposition.

L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le fait que la durée de l'essai est très longue et peut atteindre plusieurs dizaines d'années. Pendant ce temps, l'installation doit être entretenue ainsi que des tests et mesures périodiques doivent être faits. Les résultats finaux ne sont disponibles que bien des années après la mise en place de l'essai. Les échantillons sont installés dans des conditions approchant le plus possible des conditions réelles et soumis aux contraintes combinées (pluie, poussière, UV, température, humidité etc.) ce qui ne permet que difficilement de déterminer l'influence individuelle de chaque contrainte. Ceci malgré le fait que les données météorologiques sont en général enregistrées en parallèle.

Un exemple représentatif de ce type d'essai est l'ESSAI DE VIEILLISSEMENT DE LONGUE DURÉE POUR DES MATÉRIAUX DE RECOUVREMENT DE CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES⁴³ effectuée par le INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK (SPF) de la HOCHSCHULE FÜR TECHNIK RAPPERSWIL (HSR) entre 1985 et 2005 (Ruesch et Brunold, 2008). Dans cet essai, 58 matériaux différents (verres et matières plastiques transparents) ont été exposés pendant vingt ans sur deux sites en Suisse (Rapperswil, SG et Davos, GR). Les qualités optiques (transmission lumineuse des échantillons ont été testés après 40 jours, 1, 3, 10 et 20 ans.

Analyse sur bâtiments

Une deuxième méthode utilisée consiste en l'examen de matériaux sur des bâtiments existants. L'avantage de cette méthode réside dans le fait que l'on peut facilement trouver des bâtiments avec des constructions similaires mais des âges différents. Toutefois si l'on désire examiner des objets âgés de plusieurs dizaines d'années, il est souvent difficile sinon impossible de connaître l'historique des différentes parties car elles ont généralement subi des interventions au cours du temps dont on ne connaît plus exactement la date. En plus, les conditions d'exposition varient d'un bâtiment à l'autre et ne sont pas connues exactement.

Le travail présenté par Gaspar et de Brito (2005) est un exemple de ce type d'investigations. Dans cette étude, des façades crépies au mortier de ciment ont été analysées. Pour chaque objet, un niveau de dégradation est déterminé selon une méthode visuelle. Ces niveaux de dégradation sont ensuite mis en relation avec l'âge des objets pour en déterminer une courbe de dégradation telle que présentée en figure 2.20.

⁴¹En anglais et en allemand, ce type de vieillissement est appelé *natural weathering* ou *Freibewitterung*, ce qui précise que les échantillons sont soumis à des conditions météorologiques. Dans d'autres cas, vieillissement correspond plutôt à *aging* ou *Alterung*.

⁴²En anglais : *short-term exposure* ou *accelerated weathering*.

⁴³Titre original : *Langzeitalterungsuntersuchung an Abdeckmaterialien für thermische Sonnenkollektoren*.

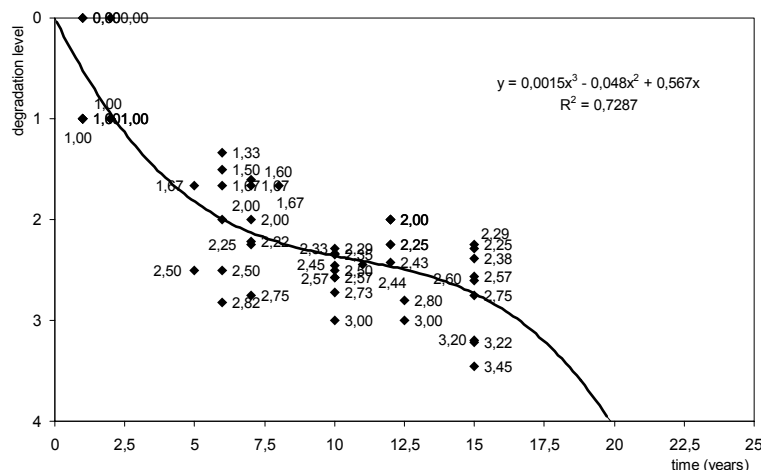


FIG. 2.20 – Exemple de courbes de dégradation (Gaspar et de Brito, 2005)
30 façades à Lisbonne - Environnement urbain près de routes principales, sans influence marine

Généralement, les données ainsi obtenues peuvent être utilisées dans la détermination de la durée de vie par des méthodes statistiques⁴⁴ ou comme *durée de vie de référence* (RSL) pour la méthode factorielle. Ceci car les données sont traitées sans distinguer les différentes conditions environnementales et de fonctionnement. Une analyse plus fine qui tiendrait compte de ces paramètres permettrait d'obtenir aussi des informations concernant l'influence de ces dernières sur la dégradation du composant. Cela pourrait servir p.ex. à la définition des *facteurs modifiants* de la méthode factorielle. Pour être applicable, cette démarche nécessite par contre une grande quantité d'échantillons dont les conditions environnementales et de fonctionnement sont également connues.

Comme pour le *vieillessement naturel* et les *méthodes statistiques*, ce type d'investigations ne s'applique raisonnablement que sur des composants d'un certain âge et ne permet pas de tester de nouveaux systèmes constructifs.

Vieillessement accéléré

Pour obtenir des résultats plus rapidement, les phénomènes d'altération peuvent être accélérés en augmentant les intensités des agents dégradants. Daniotti et Re Cecconi (2010) présentent une dizaine de méthodes de tests actuellement utilisées ou en cours de développement concernant divers matériaux ou composants utilisés dans la construction.

L'étude de Köhl et al. (2005) est un exemple d'application de ce types d'essais sur des verres polymères utilisés dans des applications solaires. Par comparaison entre des essais de vieillissement naturel et de vieillissement accéléré (voir figure 2.21), ils établissent un modèle de prédiction permettant d'estimer, sur la base de résultats de tests accélérés, l'évolution dans le temps de la perte de transmission lumineuse.

Bien que la durée d'essai, par cette manière de tester les matériaux, puisse être considérablement réduite, la difficulté réside dans la transposition des résultats obtenus dans une échelle de temps réel, c.-à.-d d'obtenir la relation entre une exposition artificielle de forte intensité et une exposition naturelle. Daniotti (2005) décrit une étude effectuée sur des peintures organiques appliquées sur des murs en maçonnerie pour déterminer la relation entre des cycles de vieillissement accéléré et de vieillissement naturel.

⁴⁴Voir paragraphe 2.3.1, l'allure des courbes de la figure 2.20 est par ailleurs similaire aux courbes du modèle de Schröder (1989) illustrées en figure 2.6.

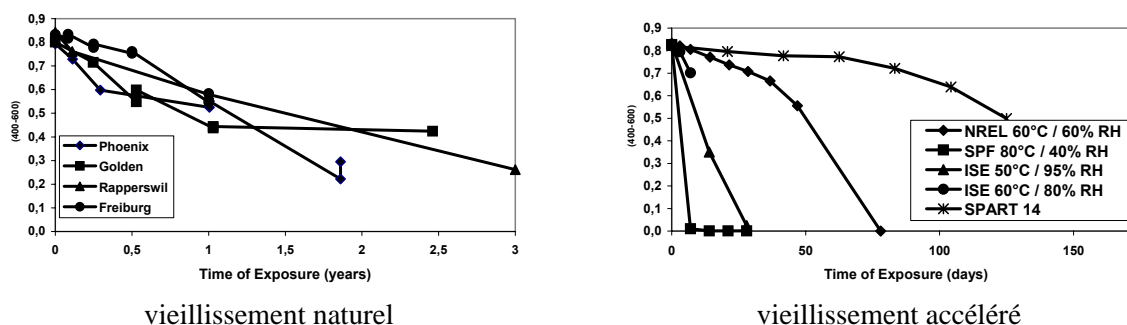


FIG. 2.21 – Résultats d'essais de vieillissement pour des verres PVC
(source : Köhl et al. , 2005, fig. 2 et 4)

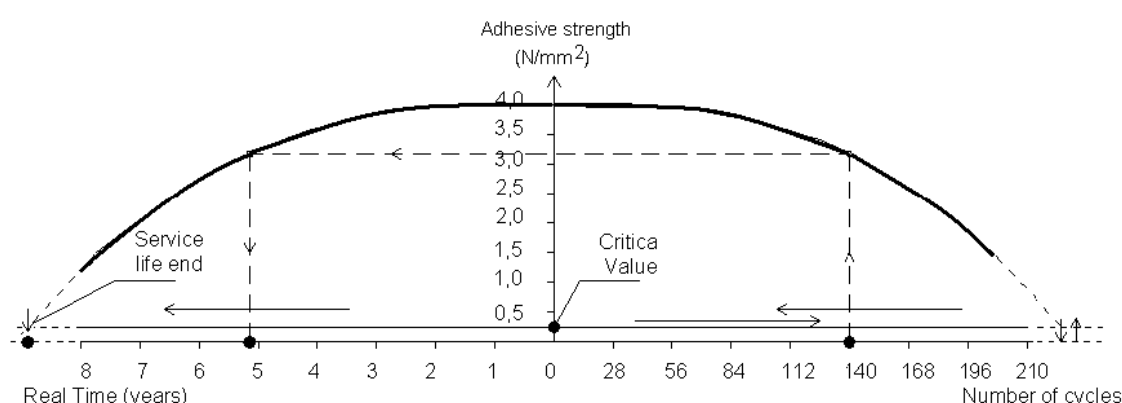


FIG. 2.22 – Corrélation entre des cycles de vieillissement artificiel et le temps réel d'une exposition naturelle
(source : Daniotti et Re Cecconi, 2010, CIB W080 : Test Methods for Service life Prediction, p.56)

Le département de Génie Civil et d'Architecture de l'Université Technique de Lisbonne (DECivil-IST) et le Laboratoire de Physique du Bâtiment de la Faculté d'Ingénieur de l'Université de Porto (FEPU) mènent conjointement une recherche sur la dégradation de façades crépies au mortier.⁴⁵ La figure 2.22 montre la corrélation trouvée entre les cycles d'essais de vieillissement artificiel et le temps réel d'exposition naturelle.

2.4 Origines de la méthode

Ce paragraphe a été introduit pour retracer les motivations et un bref aperçu des diverses investigations ayant conduit au développement de la méthode de simulation dont fait objet cette thèse. L'historique plus détaillé est développé en annexe C.1.

Les manières de simuler le vieillissement d'éléments de construction présentées dans ce travail sont issues d'une série de programmes de recherches menées par François Iselin, architecte expert au département d'architecture de l'EPFL en collaboration avec d'autres personnes.

ACE

Les premiers travaux à l'EPFL essayant de tirer profit de l'apparition de moyens informatiques pour créer des outils d'aide à la décision pour le secteur de la construction remontent au début des années 1980. A cette époque, F. Iselin, en collaboration avec Jacques Menu de la *Chaire d'Informatique Appliquée* (prof. Ch. Rappin) proposent de mettre au point une méthode d'*Aide à la Conception des Enveloppes* (ACE). Conçu comme

⁴⁵Le projet est décrit dans Daniotti et Re Cecconi (2010), p.49-58.

un système expert, cet outil cherchait, selon des algorithmes spécifiques, les compositions de matériaux les plus adéquates, en fonction de performances de séparation attendues, de critères de durabilité et de coût ainsi que d'indications concernant les milieux de part et d'autre de l'élément d'enveloppe.

De ces recherches sont nés les concepts de *Milieu*, de *Contrainte*, de *Performance* et de *Rôle* présentés ci-après dans le chapitre 3 - MÉTHODE.

Plusieurs versions d'ACE ont vu le jour entre 1984 et 1990. Dans un premier temps programmé en langage *Prolog* sur des ordinateurs centraux VAX, l'outil a, à la fin, été développé sur des ordinateurs Macintosh en utilisant des bases de données *Oracle* et le langage de programmation *Pascal*. La programmation de cette dernière version est effectuée par Hervé Lequay, architecte informaticien, qui a rejoint le projet en 1990.

AMB

Le projet *Assistance à la Maintenance de Bâtiments* (AMB), cofinancé par l'Etat de Vaud et l'EPFL, est lancé en 1992. Les objectifs de cette recherche sont :

- a) de compléter par des recherches les connaissances sur les caractéristiques des matériaux et des composants d'enveloppes, leur comportement et en particulier leur durabilité lorsqu'ils sont soumis à diverses sollicitations ;
- b) de répondre au moyen d'un programme informatisé aux questions suivantes :
 - quelles dégradations affecteront les bâtiments à l'avenir ?
 - où seront-elles localisées ?
 - de quelle nature sont-elles ? et quelles en sont les conséquences ?
 - quel sera le coût de la réfection ?

Pour développer cet outil informatique, les auteurs peuvent s'appuyer sur les résultats et les expériences du projet ACE même si l'objectif est quelque peu différent. Le logiciel de AMB étant destiné à une utilisation dans le domaine de la planification de la maintenance, il ne s'agit plus de trouver la meilleure solution pour une situation donnée, mais de pouvoir fournir une prévision de durabilité pour des configurations d'enveloppes concrètes, déjà en place. Ainsi, il était prévu de mettre au point un logiciel qui, après saisie de données du bâtiment sur plan ou sur place, fournit instantanément à un utilisateur formé des résultats exploitables.

Le développement de l'outil, entièrement programmé en *Pascal*, est mené par F. Iselin et F. Lequay.

C'est à cette occasion que sont repris des concepts de *Performance* et *Contrainte* pour développer un modèle de simulation temporelle permettant de prédire l'évolution des performances dans le temps.

En plus de données concernant la durabilité, l'outil donne également des informations concernant les points critiques à vérifier ou concernant l'écobilan des matériaux.

Entre 1992 et 1996, le logiciel est présenté dans plusieurs conférences internationales et dans des revues spécialisées et, à partir de 1995, quelques exemplaires sont vendus en Suisse et en Italie.

Des difficultés de financement sont principalement à l'origine de l'arrêt du développement du logiciel AMB en 1997.

Bilan

En 2004, l'établissement d'un bilan des travaux accomplis, basé sur la documentation disponible et une discussion avec les auteurs d'AMB, permettait de mettre en évidence les points suivants :

Documentation de la méthode

De 1992 à 1997, le développement de la méthode s'est fait en même temps que la création de l'outil AMB.

Ceci dans le but de pouvoir rapidement disposer d'un produit qui peut être commercialisé et par ce biais, financer ses futures extensions et affinages. C'est pourquoi, la documentation publiée présente avant tout les aspects liés à la manipulation ainsi qu'aux possibilités d'utilisation de l'outil⁴⁶. La modélisation des divers matériaux est préparée par F. Iselin dans des documents internes sous forme de piles Hypercard et programmée par H. Lequay.

Pour rendre accessible au monde scientifique les fondements et principes cette méthode, un important travail de compilation et de description était encore nécessaire.

Utilisation de l'outil

Le logiciel AMB a été programmé en langage Pascal pour un environnement Apple-Macintosh. Depuis 1997, tout développement et mise à jour ont été arrêtés. Ainsi, l'introduction de nouveaux standards pour les ordinateurs Macintosh (OS X)⁴⁷ a rendu l'outil obsolète, car son exécution sur des ordinateurs récents est devenue impossible. Une adaptation voir une re-programmation complète de l'outil était devenu indispensable. Dans le deuxième cas, il était souhaitable, selon les auteurs d'AMB, d'apporter les modifications suivantes :

Migration vers Microsoft-Windows

Etant donné que la majorité des ordinateurs sont équipés du système d'exploitation de Microsoft, il est devenu indispensable d'offrir une version pour cette plate-forme si on désire s'assurer d'une large diffusion d'un logiciel. Dans cette même logique, la nouvelle version d'AMB devait fonctionner sur Microsoft-Windows.

Traduction dans d'autres langues

Le développement d'AMB s'est fait en langue française ce qui limitait également sa diffusion en Suisse et au niveau international. C'est pourquoi il était souhaité de pouvoir disposer de versions en plusieurs langues, notamment en anglais et en allemand.

Intégration des marges d'erreurs et des facteurs aléatoires

La simulation des effets de vieillissement dans l'outil AMB se faisait avec des paramètres discrets. Ainsi les résultats étaient également des indications discrètes du type : *Défaillance de la couche Peinture après 10 ans*. En réalité, il est illusoire de vouloir prévoir des événements avec cette précision car, à tous les niveaux, les marges d'erreurs et les facteurs aléatoires doivent être pris en compte et se refléter dans la présentation des résultats. Les modèles et la simulation devaient donc être adaptés dans ce sens pour indiquer aussi un taux de fiabilité de la prévision du type : *Il y a 30% de chance que la couche Peinture soit défaillante après 10 ans*.

Compléter l'implémentation de matériaux

En l'état, seulement une trentaine de matériaux de construction ont pu être modélisés. Ceci n'était de loin pas suffisant pour couvrir la large gamme des matériaux actuellement utilisés dans la construction. Pour parvenir à un outil complet, il est indispensable de modéliser encore un grand nombre de matériaux manquants.

Aujourd'hui, avec un recul de 13 ans, on doit toutefois constater que les travaux d'ACE et d'AMB étaient très avant-gardistes pour leur époque. La volonté d'utiliser les possibilités offertes par les nouvelles technologies numériques pour rendre un savoir d'expert accessible via des outils informatiques a ouvert de nouvelles voies et permis d'explorer des approches innovatrices pour trouver des réponses à des questions anciennes mais toujours d'actualité.

La comparaison avec d'autres recherches, actuellement en cours dans le domaine de l'estimation de la

⁴⁶Voir chapitre C.1 Origines de la méthode.

⁴⁷AMB fonctionnait uniquement sur des ordinateurs Apple-Macintosh jusqu'au système d'exploitation OS9. Avec l'introduction du système OS X vers 2003, et l'utilisation de processeurs INTEL dès 2005, la retro-compatibilité avec des anciens systèmes d'exploitation n'est plus assurée. Ceci a eu comme conséquence que tous les logiciels n'étant plus mis à jour tels que AMB, sont devenus obsolètes car ils ne fonctionnent plus sur les nouveaux ordinateurs équipés d'OS X.

durée de vie⁴⁸, permet également de constater que les concepts développés dans le cadre des projets ACE (1984-1991) et AMB (1992-1997) ont mené à une approche qui est, aujourd'hui encore, d'actualité avec un très grand potentiel de développement. Ils ouvrent des voies innovatrices pour aborder la question de la prédiction du vieillissement des matériaux et des éléments de construction.

⁴⁸Voir chapitre 2.3.2 *Planification de la durée de vie*

Chapitre 3

Méthode

La présentation du principe de simulation a été séparée en deux parties : le chapitre MÉTHODE et le chapitre MODÈLE. Cette description en deux temps a été décidée pour faire une distinction claire entre les parties immuables, formant la base de la démarche, et les parties d'application, susceptibles d'évoluer au fur et à mesure de l'avancement de la connaissance dans le domaine du vieillissement des matériaux. Ainsi, le chapitre *Méthode* est consacré à la description des concepts et des principes fondamentaux alors que le chapitre *Modèle* présentera la construction du modèle de calcul et les algorithmes utilisés dans la simulation actuelle. Ces derniers sont pour l'instant très simples mais peuvent progressivement être mis à jour et affinés.

Dans un bâtiment, la délimitation des différents espaces est faite par des éléments surfaciques¹ tel que des murs, des toitures, des planchers, des cloisons etc. La spécificité de ces composants surfaciques réside dans le fait qu'ils constituent, la plupart du temps, une limite entre deux milieux ayant des caractéristiques très différentes. Pour être efficace, ils doivent alors avoir un *pouvoir de séparation* afin de préserver l'un des milieux des nuisances de l'autre. Dans le cas d'un bâtiment habité par exemple, les éléments d'enveloppe protègent l'espace intérieur des conditions extérieures tel que le chaud, le froid, le vent, les intempéries, le bruit, les eaux souterraines etc.

Une analyse des multiples systèmes constructifs utilisés dans les ouvrages anciens et modernes permet de constater également qu'il s'agit, dans presque tous les cas, de composants construits avec différents matériaux mis en place par couches successives. Ceci est valable pour les murs de maçonnerie enduits et peints tout comme pour les divers systèmes de toitures ou planchers.

La méthode présentée dans ce rapport est destinée à l'analyse d'éléments de construction remplissant les deux critères suivants :

- ils forment un élément surfacique dont les faces sont exposées à des milieux et
- ils sont formés par plusieurs couches.

Par extension, elle a le potentiel d'être aussi utilisée dans d'autres configurations comme p.ex. des peintures sur des structures en acier.

3.1 Définition des concepts

Avant d'entrer dans la description de la méthode de simulation, il est utile de donner la définition de quelques concepts et termes.

Rôle

Une première observation concernant les éléments de construction permet de constater qu'ils doivent tous remplir une ou plusieurs fonctions simultanément. Pour préserver l'espace intérieur des nuisances extérieures, ils doivent être étanches à l'air et à l'eau. Suivant des cas, ils doivent laisser pénétrer la lumière, porter

¹Par élément surfacique nous entendons des objets dont une des trois dimensions est beaucoup plus petite que les deux autres.

d'autres éléments etc. Toutes ces fonctions diverses sont regroupées dans la notion de *Rôles*. Un *Rôle* étant une tâche attribuée à un élément de construction pour que l'ensemble de l'ouvrage puisse remplir les *exigences humaines* telles que définies par Blachère (1969)². Nous verrons plus loin de quelle manière ces *Rôles* interviennent dans la définition des critères de défaillance et l'estimation de la durée de vie.

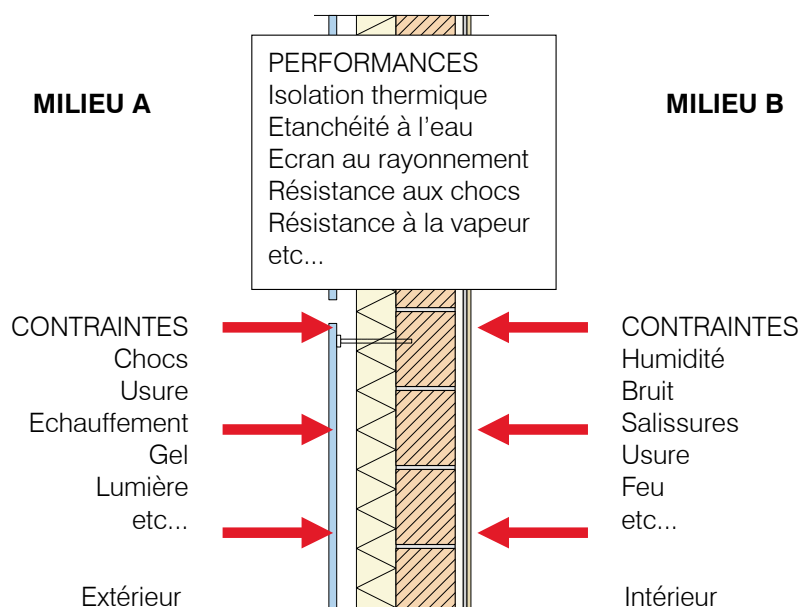


FIG. 3.1 – Les composants ont des *Performances* et subissent des *Contraintes*

Contrainte

Lorsqu'on analyse les divers composants d'un bâtiment du point de vue de leur vieillissement, il apparaît dans presque tous les cas que les dégradations et détériorations constatées sont dues à l'influence de sollicitations extérieures. En général, ces sollicitations sont d'origine climatique, liées à une activité humaine ou encore en relation avec la gravitation terrestre. Pour tenir compte dans notre étude des processus de dégradation de toutes ces actions très variées, le concept des *Contraintes* a été introduit. Cette notion regroupe, dans notre cas, toutes formes de sollicitation agissant directement sur les matériaux et ayant un effet sur eux³. Ce sont des conditions venant de l'environnement mais pouvant également pénétrer dans un élément et solliciter ses parties internes.

Performance

A l'instar d'une machine, le "bon fonctionnement" d'un bâtiment dépend de l'état et du "bon fonctionnement" de l'ensemble de ses composants. Pour qualifier et mesurer ce "bon fonctionnement", on a généralement recours à la notion de *Performance*⁴.

Dans notre cas, le concept de *Performances* est utilisé pour exprimer des *caractéristiques* ou des *qualités chiffrées* d'un bâtiment, d'un composant ou d'un matériau. Ceci permet d'attribuer des valeurs numériques à un état dans le but de pouvoir calculer l'évolution de ce dernier dans le temps. Comme les *Contraintes*, la notion de *Performances* ne regroupe pas uniquement certaines grandeurs physiques mais aussi des propriétés autres telles que l'aspect etc. En même temps, toutes les propriétés ne doivent pas être considérées comme des performances. Ainsi la *masse* du composant p.ex. n'est pas obligatoirement une performance

²Voir chapitre 2.1 Durabilité.

³Dans la science des matériaux, la notion de *contrainte* est plutôt utilisée pour décrire des contraintes mécaniques, c.à.d. la répartition de charges à l'intérieur d'un matériau qui est soumis à des efforts mécaniques. Notre définition se veut en quelque sorte plus large afin de permettre d'y inclure tout type de sollicitation.

⁴*performance* (en : *performance*, de : *Leistung*) - Définition selon *Le Petit Robert* Ed.1990 : **PERFORMANCE** n.f. (1839 ; mot anglais, de l'ancien français *parformance* [XVIe], de *parformer* "accomplir, exécuter"). Résultat chiffré obtenu par ... ou Résultat optimal qu'une machine peut obtenir.

mais uniquement un attribut car *être lourd* ou *être léger* ne peut pas être associé à une fonction dans notre cas.⁵

3.2 Composants surfaciques multicouches

Comme constaté auparavant, les éléments de construction séparant deux milieux sont presque exclusivement composés de différents matériaux ayant été mis en place par couches. Ces couches ont chacune un rôle spécifique à jouer pour que l'élément entier puisse remplir ses fonctions.⁶

Dans ces constructions multicouches, les couches extérieures ont pour fonction de protéger ou "cacher" les couches intérieures plus fragiles ou ne présentant pas un aspect acceptable. Les couches intérieures ont d'autres rôles comme p.ex. être le support structural des couches de finition, conférer à l'ensemble une isolation thermique suffisante conformément aux exigences légales et bien d'autres.

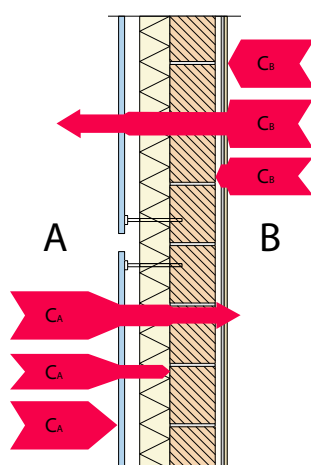


FIG. 3.2 – Les contraintes sont atténuées par les diverses couches

L'ordre des différentes couches est également essentiel pour assurer le bon "fonctionnement" de l'élément. Ainsi chaque matériau a sa position et son rôle dans l'ensemble constructif. Dans une façade avec un bardage extérieur par exemple, il ferait peu de sens de mettre l'isolation thermique devant le bardage car ce dernier doit justement protéger le matériau isolant des intempéries et des sollicitations mécaniques. (voir figure 3.1).

Transposant ceci au concept des *Performances* et des *Contraintes*, on peut établir que chaque couche constitue un obstacle spécifique, modifiant la progression des *Contraintes* à travers le composant. En fonction de leurs *Performances*, elles atténuent ou stoppent la pénétration d'une ou plusieurs *Contraintes* avant que ces dernières n'atteignent la couche suivante. Par cela, les couches suivantes sont protégées d'une dégradation prématurée et le milieu intérieur préservé d'insalubrité.

La figure 3.3 illustre cette *Propagation des contraintes* à travers les couches d'un élément de construction.

3.3 Dégradation

Le vieillissement dans le temps d'un composant "en service" est dû à la modification physique ou chimique des matériaux dont il est constitué. Cette transformation de la matière entraîne inévitablement aussi une

⁵Comme présenté dans certains écrits concernant la durabilité, la durée de vie est aussi une performance en soi exprimée en années ou toute autre échelle du temps. Pour notre travail par contre nous utilisons, en règle générale, le terme *Performance* pour exprimer un état à un moment donné.

⁶Addleson et Rice (1991) l'ont décrit ainsi : "Almost all modern constructions, including most that have a traditional appearance, are multi-layer in character. Each separate layer usually performs a specific function. ...", chapitre *Introduction*, p.7.

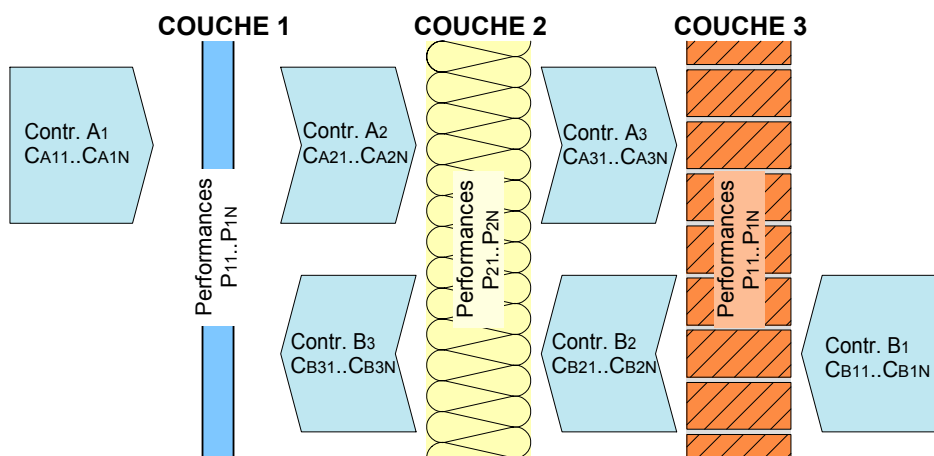


FIG. 3.3 – Schéma modèle

modification de ses caractéristiques et de ce fait une variation de ses performances.

Etant donné que cette modification opère, presque toujours, dans le sens négatif, on parle alors de dégradation, d'altération ou de détérioration. Le type et la vitesse de ce vieillissement d'un matériau dépendent d'une part de la nature ainsi que de l'intensité des sollicitations auxquelles ce dernier est exposé, d'autre part, des caractéristiques physiques et chimiques du matériau même. Ces caractéristiques déterminent le comportement face aux sollicitations.

Dans un élément de construction, une perte de performance d'un des matériaux provoque aussi une perte de la performance globale ou une perte de la protection d'autres couches, entraînant à leur tour une perte de performance globale. Ces phénomènes de dégradation conduisent à la longue, par des effets en cascade, à la ruine de l'élément entier.

Pour reprendre l'exemple de la façade avec bardage extérieur, on peut intuitivement comprendre que, tant que le bardage est en bon état, l'isolation est correctement protégée contre le mouillage par la pluie. Par contre, lorsque ce bouclier vieillit et s'affaiblit, on doit craindre que l'isolation se gorge d'eau et se dégrade à son tour. Dans ce cas, après un "certain" temps, l'isolation thermique diminue et l'élément de façade ne peut plus remplir son rôle d'élément isolant.

L'état des *Performances* reflète, de cette manière, l'état des couches respectivement leur stade d'altération. Les phénomènes de dégradation peuvent alors être exprimés par des *Variations de Performances*. L'ampleur de ces variations et par conséquent la vitesse de dégradation, dépend du comportement spécifique des matériaux face aux divers types et intensités de *Contraintes*.

3.4 Durée de vie

Comme mentionné plus haut, lors de l'introduction du concept des *Rôles*, un élément de construction doit généralement assumer plusieurs fonctions simultanément. Selon s'il s'agit d'un élément de façade, de toiture, de cloison ou de plancher, il doit par exemple garantir la stabilité de l'ouvrage, limiter les déperditions calorifiques ou protéger les espaces intérieurs des intempéries, remplir des critères esthétiques etc. Tant qu'il peut remplir ces fonctions, on peut considérer l'élément en question apte au service. Par conséquent, la *fin*

de vie sera atteinte lorsque *l'élément ne peut plus remplir un ou plusieurs de ses rôles*. Ainsi sa durée de vie sera le laps de temps écoulé entre la date de sa mise en service et la date de sa fin de vie.

Les rôles eux-mêmes sont étroitement liés aux performances. Ceci parce que la vérification, si un composant peut toujours remplir un rôle spécifique ou non, peut être faite par la surveillance d'une ou plusieurs de ses performances globales. La comparaison de ces performances avec des valeurs d'exigence minimale permet de définir des critères de défaillances. Le rôle *Être étanche à l'eau* par exemple dépend de la relation entre la performance *Étanchéité à l'eau* du composant et de la contrainte *Présence d'eau* de l'environnement. Si le degré d'étanchéité est supérieur à l'intensité de *Présence d'eau*, l'eau ne peut traverser le composant, il est donc étanche. Dans le cas contraire, le composant ne peut empêcher la pénétration d'eau dans le milieu sec et, par conséquent, ne peut plus remplir son rôle.

En principe, les limites de performances ou *Exigences* peuvent être évolutives dans le temps. Ceci lorsque des valeurs d'isolation thermique dépendent de normes ou lorsque les contraintes sont modifiées par un changement d'affectation ou toute autre modification de l'environnement. Ces cas relèvent néanmoins plutôt des domaines des obsolescences techniques ou fonctionnelles (voir chapitre 2.1.3), dont nous ne tenons, pour le moment, pas compte dans notre estimation de la durée de vie.

Dans l'estimation de la durée de vie déterminée par une *obsolescence matérielle ou physique* uniquement, on admet que les valeurs limites ou *Exigences* sont invariables au cours du temps. Ainsi, la réponse à la question *Combien de temps les différents Rôles peuvent-ils être remplis ?* dépend alors uniquement de l'évolution temporelle des *performances* d'un élément. Dans ce cas, la fin de vie est atteinte lorsqu'une des performances dépasse son seuil critique, généralement une limite minimale.

On peut définir par exemple que le rôle d'isolant thermique est assuré tant que la valeur U est inférieure à $0.3 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Cette limite dépassée, l'isolation thermique est insuffisante et l'élément doit être considéré comme défaillant.

Des associations similaires entre *Rôle* et *Performance* peuvent être introduites pour tous les *Rôles*. Ceci permet de définir une série de *Performances limites* synonyme de fin de vie de l'élément. La *durée de vie* d'un élément est alors la durée entre le moment de sa construction et le moment où la première performance dépasse son seuil critique. La figure 3.4 illustre de manière schématique comment la durée de vie est estimée à partir d'évolutions de performances dans le temps et des limites de défaillances.

La figure 3.4 montre l'évolution hypothétique de performances et la détermination de la durée de vie.

Cette définition de la *Durée de vie* correspond également à la définition selon ISO 15686 Part1, (art. 3.1.1) : *Période débutant avec la mise en service, pendant laquelle un bâtiment ou ses différentes parties satisfont tout juste ou largement aux exigences de performance ou font mieux*.

Ce principe de déterminer la durée de vie par le temps écoulé jusqu'au franchissement d'un seuil de performance est également utilisé par d'autres méthodes telle que la Méthode de Limites de Performances (PLM) présentée par Daniotti et Lupica Spagnolo (2008) ou l'estimation de la durée de vie basée sur l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) présentée par Talon, et al. (2005 et 2008).

Talon et al. (2008) présentent un exemple d'un double-mur en brique de terre cuite auquel 5 fonctions des performances sont attribuées avec des seuils correspondants pour chaque performance. Ce sont :

- F1 : Arrêter le flux d'agents environnementaux
- F2 : Absorber les irradiations infrarouges, les températures et le bruit
- F3 : Résister mécaniquement
- F4 : Résister à l'influence des agents environnementaux
- F5 : Être en conformité avec les normes et les exigences

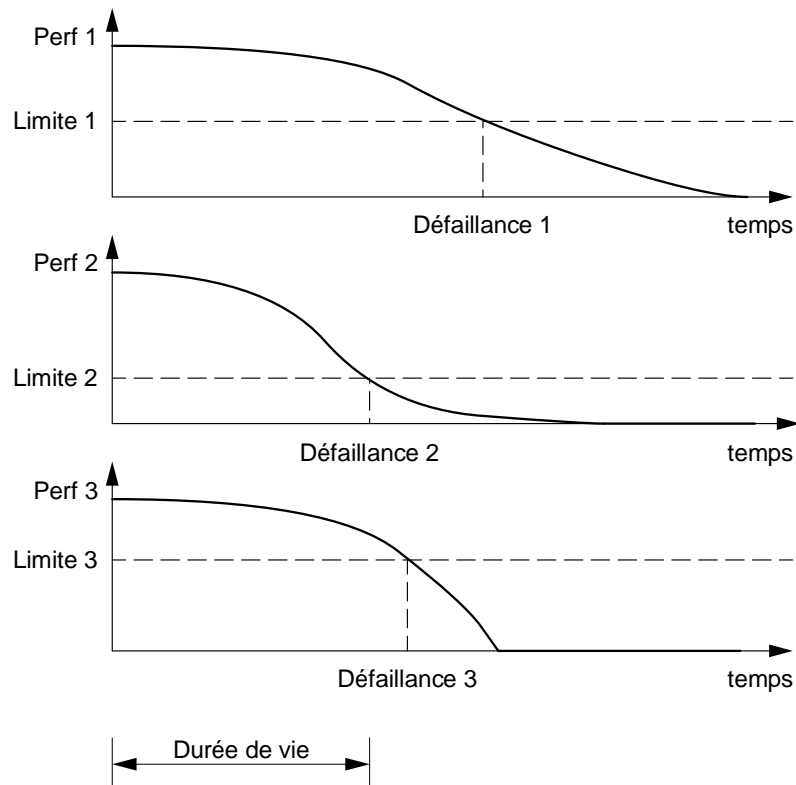


FIG. 3.4 – La première défaillance est déterminante pour détecter la fin de vie

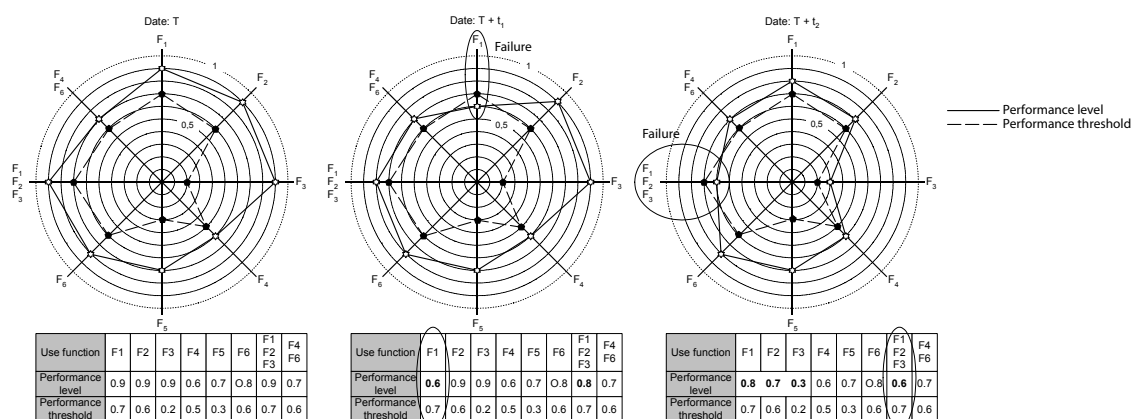


FIG. 3.5 – Exemples de rosaces multi-performances

Sur la rosace de gauche il n'y a pas de défaillance, dans les deux autres cas, le composant est défaillant.

(source : Talon 2005)

L'état des performances à une date donnée est présenté par une rosace multi-performances telle qu'illustrée dans la figure 3.5.

Dans le cadre de la méthode présentée dans ce travail, l'essentiel de la simulation consiste à déterminer l'évolution des performances dans le temps par le jeu d'interaction des performances de chaque couche avec les contraintes (voir chapitre suivant). Après chaque cycle de calcul, les performances déterminantes sont comparées à leurs valeurs limites et les insuffisances détectées notifiées sous forme d'événements d'alerte en indiquant la date de défaillance.

3.5 Principe général

La simulation du comportement d'un élément de construction ainsi que l'estimation de sa durée de vie met en relation les différentes notions ainsi que les concepts décrits précédemment. La figure 3.6 illustre ces relations de manière graphique.

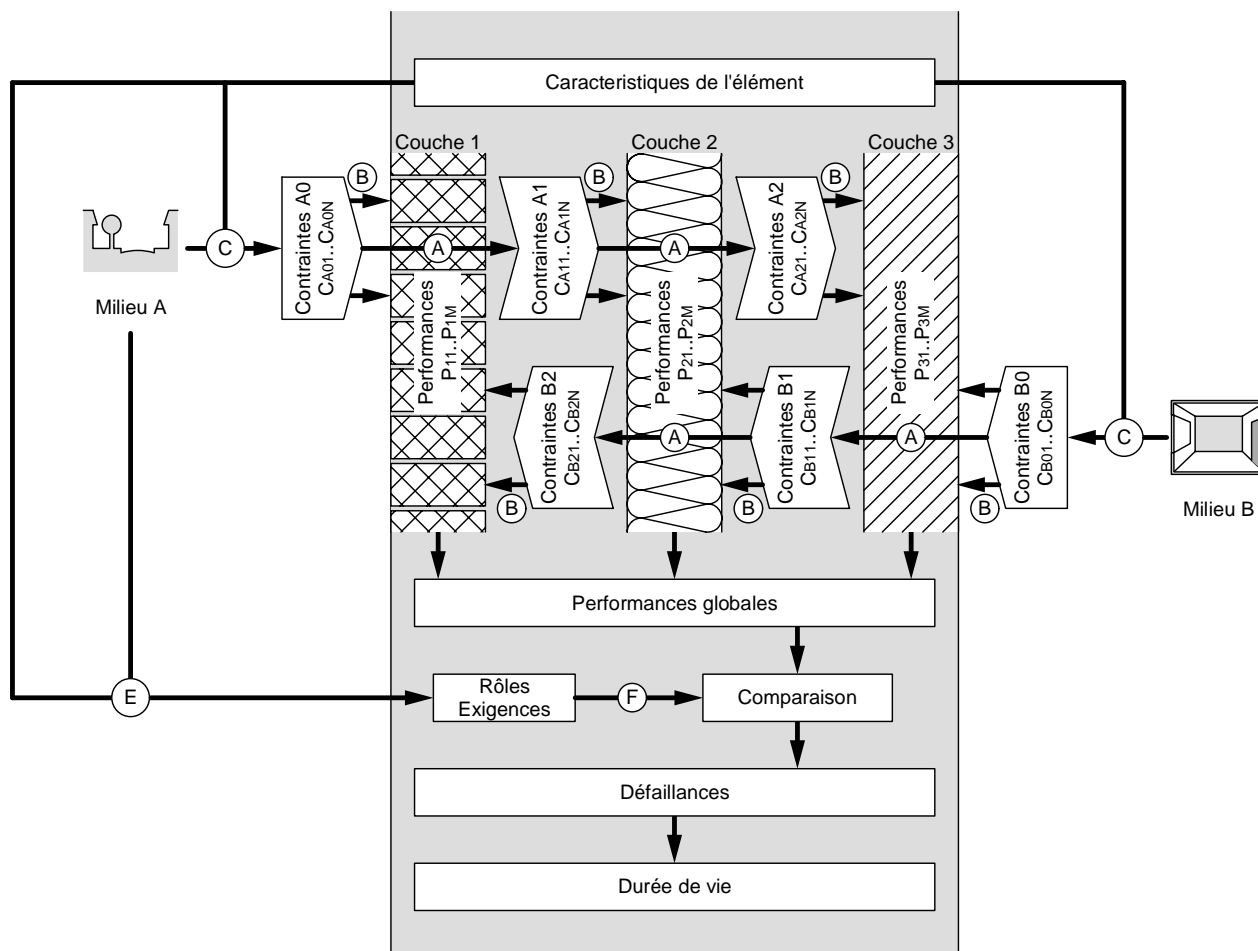


FIG. 3.6 – Différents composants du modèle

Remarque : Les lettres entourées désignent des relations qui sont décrites dans le texte

Au cœur même de la simulation, les deux premières relations concernent l'interaction entre les contraintes et les performances soit :

- Ⓐ la propagation des contraintes en fonction des performances et
- Ⓑ la variation des performances en fonction des contraintes.

Ces deux interactions sont décrites de manière détaillée au chapitre suivant (3.6).

Une autre tâche de la modélisation consiste à pouvoir déterminer la nature et l'intensité des diverses contraintes agissant sur l'élément Ⓒ. Cette "force" des contraintes est déterminée par les caractéristiques du milieu pondéré par des facteurs tenant compte du rapport de l'élément avec le milieu. Le chapitre 3.7 décrit le concept des milieux ainsi que la relation des contraintes avec ces derniers.

Une troisième partie de la simulation doit se consacrer à l'identification des rôles Ⓔ ainsi que la détermination des exigences de performances associées Ⓕ. Ceci dépend avant tout du *pouvoir de séparation* attendu de la

paroi, mais aussi du type et du niveau des contraintes d'action.

3.6 Interactions entre Contraintes et Performances

La modélisation du fonctionnement et des phénomènes de détérioration d'un élément multicouche à l'aide des concepts définis au paragraphe 3.1, peut se faire par la description de l'influence mutuelle des deux vecteurs : les *Contraintes* et les *Performances*.

L'interdépendance de ces deux vecteurs vient d'une part du fait que les *Performances* des diverses couches d'un élément de construction empêchent la pénétration des *Contraintes* ou du moins atténuent leur progression. Nous appelons cette relation *Propagation des contraintes*. D'autre part, les *Performances* d'un matériau sont altérées lorsqu'elles sont soumises aux *Contraintes*. Cette dégradation se traduit par une *Variation des performances*.

Pour reprendre l'exemple du mur avec isolation et bardage extérieur (fig. 3.2), nous constatons que les rôles du bardage sont multiples. Il doit empêcher les contraintes mécaniques tels que frottement, chocs etc. d'atteindre l'isolation thermique qui serait alors désintégrée rapidement par ces actions. Il doit également diminuer la propagation de précipitations telles que pluie et neige pour éviter que l'isolation thermique ne se remplisse d'eau et perde sa capacité isolante. Etant la couche visible de l'extérieur, il doit aussi présenter un aspect esthétique satisfaisant quant à sa couleur, sa texture, sa brillance etc. Une défaillance du bardage entraînera inévitablement la dégradation du pouvoir isolant de la façade et de ce fait une défaillance grave.

Ainsi, le bardage doit avoir les *performances* suffisantes pour empêcher la *contrainte des chocs* d'atteindre les couches suivantes, pour diminuer fortement la propagation de la *contrainte eau de pluie* mais aussi pour présenter un aspect esthétique satisfaisant. Si ce bardage est en bois naturel, les contraintes *rayons du soleil* et *pluie* vont, à la longue, changer la performance *aspect* du bois, mais aussi altérer d'autres performances comme l'*épaisseur*, la *planéité* de la surface etc. et provoquer ainsi la décomposition progressive du bois.

A l'exemple du bardage et de l'isolation, le modèle calcule la propagation des contraintes des milieux environnants à l'intérieur du système. En parallèle, si les contraintes atteignent une couche, les caractéristiques du matériau sont modifiées car il vieillit sous l'influence des agents tels que chocs, abrasion, eau, rayons solaires etc. Ceci jusqu'à l'apparition de désordres graves tels que la disparition partielle ou entière d'une couche.

L'enjeu de cette méthode consiste d'une part à pouvoir quantifier la propagation des contraintes à travers l'élément de construction multicouche (A). D'autre part, il est nécessaire de pouvoir déterminer la modification des performances de chaque couche en fonction des contraintes (B). Ceci permettra de déduire l'évolution des performances globales de l'élément entier.

Idéalement on pourrait dire que, si on connaît, pour chaque matériau pris individuellement, son comportement de dégradation face aux diverses influences extérieures ainsi que sa capacité à empêcher la transmission des contraintes, on peut alors modéliser les interactions et voir comment les couches se comportent lorsqu'elles travaillent ensemble.

3.6.1 Propagation des contraintes (A)

Comme mentionné au paragraphe précédent, un des deux types de relations entre *Contraintes* et *Performances* concerne la *Propagation des contraintes*. Ce sont là les règles décrivant la façon dont les contraintes agissant sur chaque face de l'élément, se propagent à travers les différentes couches et la manière dont les couches influencent cette progression.

Les règles de propagation sont dépendantes du type de contrainte et peuvent être classées en deux catégories principales de transmission, la *propagation directionnelle* et la *propagation à flux constant*.

Propagation directionnelle

Cette première catégorie de propagation s'applique aux contraintes agissant sur l'élément de manière directionnelle. Ces contraintes proviennent d'une source, généralement externe, et se propagent à l'intérieur de l'élément à travers les couches. Les diverses couches opèrent alors comme des filtres, c.-à.-d. à chaque passage de couche, la contrainte entrante est modifiée en fonction des performances de la couche. L'intensité de contrainte à la "sortie" (C_s) dépend de l'intensité d'entrée (C_e) ainsi que de la performance associée (P_c) de la couche.

$$C_s = f(C_e, P_c) \quad (3.1)$$

En même temps, la contrainte de sortie devient la contrainte d'entrée pour la couche suivante. ($C_{e_{i+1}} = C_{s_i}$)

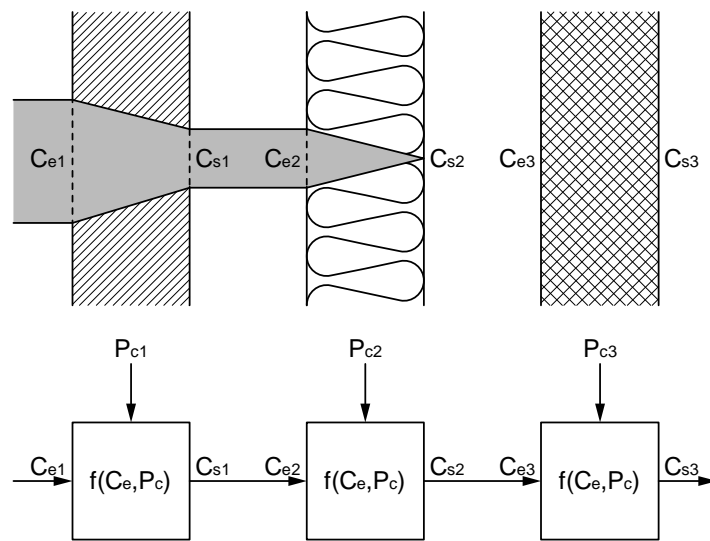


FIG. 3.7 – Propagation directionnelle

L'intensité des contraintes est atténuée par des performances spécifiques de chaque couche

L'exemple typique de cette catégorie de progression est le passage de lumière à travers différentes couches transparentes. Dépendant de sa transparence, chaque couche renvoie, absorbe ou transmet la lumière entrante. D'autres sollicitations telles que les infiltrations d'eau, les chocs ou les infiltrations d'air répondent aussi à ce type de propagation.

Un cas particulier de cette catégorie a été introduit pour permettre la simulation des phénomènes de corrosion de métaux placés à l'intérieur d'un élément de construction à l'exemple des fers d'armature dans le béton armé. Dans ce cas, la valeur-pH de l'environnement direct des métaux a une forte influence sur la vitesse de corrosion et constitue une contrainte importante. Il dépend, soit de la qualité de l'eau infiltrée, soit de la valeur-pH des matériaux voisins. Ainsi la propagation de cette contrainte se fait en fonction des matériaux. Certains matériaux transmettent la contrainte *valeur-pH* reçue tel quel, d'autres matériaux, tels que les bétons, la modifient en fonction de leurs propres caractéristiques chimiques.

Les phénomènes d'usure mécanique et de délavage constituent un autre cas particulier. Ici, les sollicitations abrasives n'agissent que sur la couche extérieure et, tant que celle-ci n'est pas entièrement usée, ces contraintes ne sont pas transmises plus loin.

Propagation à flux constant

Cette deuxième catégorie de propagation s'applique lorsqu'il y a un flux induit par des conditions différentes entre deux milieux séparés par un élément de construction. Ce flux peut être :

- un flux de chaleur induit par une différence de température (ΔT) entre les milieux,
- un flux de vapeur d'eau provoqué par une différence de pression partielle (Δp_s) ou encore
- un flux de gaz carbonique (CO_2) provoqué par une différence de concentration Δc_{CO_2} ⁷.

Dans ces trois cas, on ne peut pas proprement parler d'une progression car le niveau des contraintes (T , p_s et c_{CO_2}) dépend de l'ensemble des performances de toutes les couches ainsi que des conditions sur les faces extérieures. De manière générale, l'intensité du flux (I_F) ainsi que les niveaux de contraintes (C_i) s'équilibrent à l'intérieur par rapport à la perméabilité au flux des couches. Les lois physiques étant à la base de ces phénomènes sont similaires aux lois de conduction électrique. C'est pourquoi des analogies peuvent être faites entre la *Propagation à flux constant* et le circuit électrique. La contrainte (C) étant équivalente à la tension électrique (U) et l'intensité du flux (I_F) équivalent au courant électrique (I). Un élément de construction multicouche peut alors être représenté par un schéma électrique équivalent dans lequel la perméabilité des couches est exprimée par des résistances (R_i) connectées en série.

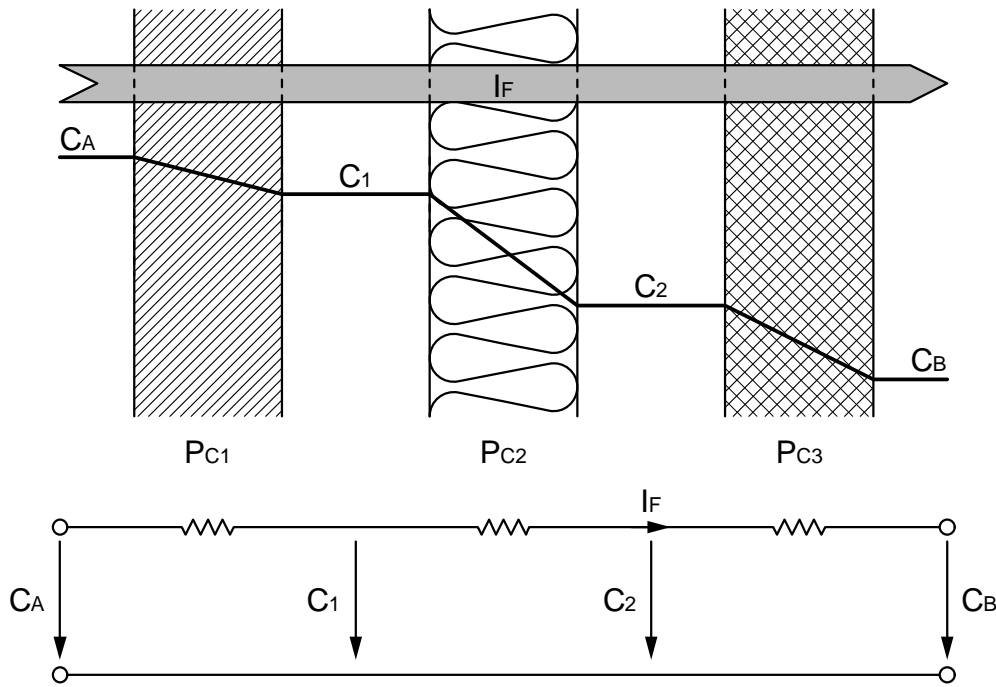


FIG. 3.8 – Schéma électrique équivalent de la propagation à flux constant

L'intensité du flux se calcule selon la formule suivante :

$$I_F = \frac{C_B - C_A}{P_{tot}} = \frac{C_B - C_A}{P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots + P_N} \quad (3.2)$$

et le niveau des contraintes à l'intérieur des couches peut être déterminé comme suit :

$$C_i = C_A + I_F \cdot (P_1 + P_2 + \dots + P_i) \quad (3.3)$$

⁷Dans le cas du gaz carbonique CO_2 , le flux est induit par un abaissement de la concentration de CO_2 à l'intérieur d'une couche de béton ou de mortier, provoqué par la carbonatation du ciment ou de la chaux.

avec :

- C_A, C_B : Contraintes agissants sur les faces A et B.
- C_i : Niveau de contrainte dans la couche i .
- I_F : Intensité du flux (en général par unité de surface [m^2])
- P_1, P_2, P_i, P_N : Résistances des couches (Performances).
- P_{tot} : Résistance de l'ensemble des couches (Performance globale).

Le tableau B.4 résume les analogies entre les différents mécanismes de flux décrits ci-dessus et le circuit électrique.

3.6.2 Variation des performances (B)

Comme déjà mentionné au chapitre 3.3, la modification du comportement physique ou de la structure chimique des matériaux peut être exprimée par une variation des performances des couches. Lorsqu'il y a altération ou dégradation, cette variation a comme conséquence la diminution d'une ou plusieurs performances. Quelles des performances sont concernées et combien elles sont modifiées dépend de la nature et de l'ampleur des contraintes ainsi que de la durée d'exposition.

De manière générale, cette variation peut être exprimée par une fonction dépendant de la performance elle-même ($P_{i,t}$), des diverses contraintes ($C_1 \dots C_N$) ainsi que de la durée d'intervalle considérée (Δt) :

$$P_{i,t+1} = f(P_{i,t}, C_1, C_2, \dots, C_n, \dots, C_N, \Delta t) \quad (3.4)$$

avec :

- $P_{i,t+1}$: Niveau de la performance i à la date $t + \Delta t$
- $P_{i,t}$: Niveau de la performance i à la date t
- $C_1 \dots C_N$: Niveaux de contraintes agissant sur la couche
- Δt : durée de l'intervalle d'itération

Idéalement, cette relation doit être connue pour toutes les performances de chaque matériau. Ce qui représente évidemment un nombre considérable de fonctions.

Une difficulté majeure, devant être surmontée pour pouvoir appliquer la présente méthode, réside dans le manque de connaissances quantitatives dans le domaine des dégradations de matériaux de construction et de ce type de fonctions. Bien que la plupart des phénomènes de dégradation soient connus sur le principe avec leurs mécanismes et leurs facteurs d'influences, il est difficile de trouver des données quantitatives concernant les vitesses d'altération mises en relation avec l'intensité des agents.

Pour la plupart des matériaux, les relations entre les agents de dégradation et la modification des performances doivent encore être déterminées. Cela pourrait se faire selon des méthodologies similaires à la *Méthodologie systématique pour prévoir la durée de vie des composants de bâtiment* présentée dans la norme ISO 15686-2 (voir figure 2.8, page 25 dans ce texte). Bien que cette méthodologie soit prévue pour établir la fonction *réponse à la dose* de composants entiers, elle peut, à notre avis, également s'appliquer à l'échelle des couches ou de matériaux seuls.

3.7 Milieux

Les sollicitations agissant sur des matériaux de construction en provoquant leur dégradation sont déterminées par des facteurs climatologiques ainsi que d'autres facteurs, liés à une *utilisation* des lieux ou toute autre activité humaine.

3.7.1 Facteurs climatologiques

Les *facteurs climatologiques* décrivent tous les agents transportés par l'atmosphère et provoquant des phénomènes de dégradation. Jernberg et al. (2004) distinguent entre trois types de climat, décrivant chacun les conditions météorologique à une autre échelle, le macro-climat, le meso-climat et le microclimat :

- a) Par *macro-climat*, on entend des conditions météorologiques communes à des zones du globe terrestre. On parle du climat polaire, climat aride, climat tropical etc. Les caractéristiques de ces zones sont décrites par l'évolution de la température et l'humidité relative, par la quantité, le type et la fréquence des précipitations etc.
- b) Le *meso-climat* décrit les conditions météorologiques d'une région en tenant compte des spécificités topographiques et géographiques du terrain. Le type de données caractéristiques et celui du *macro-climat* complété par des données concernant la force, la fréquence et la direction du vent, le nombre d'heures d'ensoleillement par année, les facteurs de pollution de l'air avec leur intensité etc.
- c) La notion de *microclimat* est utilisée pour décrire des conditions climatiques à proximité de la surface des matériaux ou d'éléments de construction. D'après Jernberg et al. (2004), la connaissance de ces conditions est *cruciale pour la compréhension et l'estimation de la dégradation des matériaux. Les variables les plus importantes décrivant le microclimat comprennent l'humidité relative, l'humidité à la surface, la température de surface, l'irradiation et le dépôt de polluants de l'air*.⁸

3.7.2 Facteurs d'utilisation

Les facteurs d'utilisation sont des sollicitations liées à une activité humaine au sens large. Ils peuvent être produits directement par des personnes ou indirectement par des engins ou animaux fréquentant les lieux. Ainsi un revêtement de sol va être utilisé par des passants, des véhicules etc. Mais aussi les murs sont sollicités lorsqu'il y a une activité à proximité. Ils peuvent recevoir des coups ou s'abîmer par frottement. Les nettoyages réguliers constituent aussi une action dégradante même sur des éléments apparemment à l'abri, tels que les plafonds.

Dans la littérature concernant la prédiction de durée de vie, ces facteurs ne sont que rarement cités. Ceci sûrement parce qu'ils influencent surtout des parties facilement renouvelables tels que les matériaux de sol, les peintures etc. étant moins critique pour la durabilité globale d'une construction et pesant aussi moins dans un bilan écologique. Néanmoins les facteurs d'utilisation provoquent des dégradations et doivent, de ce fait, être pris en compte dans un système global de prévision de durée de vie.

Selon le guide EOTA GD003 (1999), ce facteur nommé *user stresses*, provoque deux types des sollicitations mécaniques : l'usure et les chocs.

On peut trouver des procédures d'essais simulant ces sollicitations par exemple dans les normes concernant les matériaux de revêtements. Quelques-uns entre eux sont décrits au chapitre 5.1.

Bien que la norme ISO 6241 :1984 et le guide EOTA (1999) énumèrent un grand nombre d'agents ou facteurs potentiels, pour la prédiction de la durée de vie, il est important de connaître dans quelles conditions

⁸De Jernberg et al (2004), B.1.1 Climatic ranges - p.1-18, trad. de l'auteur.

ces sollicitations sont actives et quelle est leur intensité. Ces données ne sont actuellement que difficilement disponibles et doivent, dans la plupart des cas, être estimées.

Un exemple pour illustrer comment décrire des facteurs d'utilisation est donnée dans le paragraphe 4.1.3 *Objets-Milieu*.

3.7.3 Relation entre Milieu et Contraintes ©

Par analogie aux trois types de climat décrits par Jernberg et al. (2004) et cités ci-dessus, on peut introduire les termes *meso-environnement* et *micro-environnement* qui incluraient alors non seulement des conditions climatiques mais aussi des données liées à des facteurs d'utilisation. Dans ce sens, le *micro-environnement* représente alors l'ensemble des actions et conditions qui agissent sur les matériaux. Dans notre cas cela correspond aux *Contraintes* décrites au paragraphe 3.1.

Le *meso-environnement* représente alors les conditions climatiques et d'utilisation des espaces en relation avec l'élément de construction. Nous l'appellerons *Milieu*.

La relation entre *meso-environnement* et *micro-environnement* ou entre *Milieu* et *Contraintes* se fait en tenant compte des spécificités de l'élément de construction tels que son orientation par rapport au Nord, son inclinaison etc. Ainsi pour l'ensoleillement p. ex. le *Milieu* décrit la quantité de rayonnement solaire par rapport à une surface de référence et un lieu donné, tandis que la *Contrainte* correspondante doit décrire la quantité de rayonnement effectif reçu par la surface de l'élément. Les mêmes réflexions peuvent être faites pour des agents tels que le vent, la pluie. Pour les conditions d'utilisation, le *Milieu* va décrire le type et la fréquence des agents. Pour le même *Milieu* par contre, les *Contraintes* vont être différentes si la surface exposée est un sol, une paroi ou un plafond. Ceci notamment pour des sollicitations comme l'usure par abrasion, la fréquence et l'intensité de chocs mais aussi le dépôt de poussière etc.

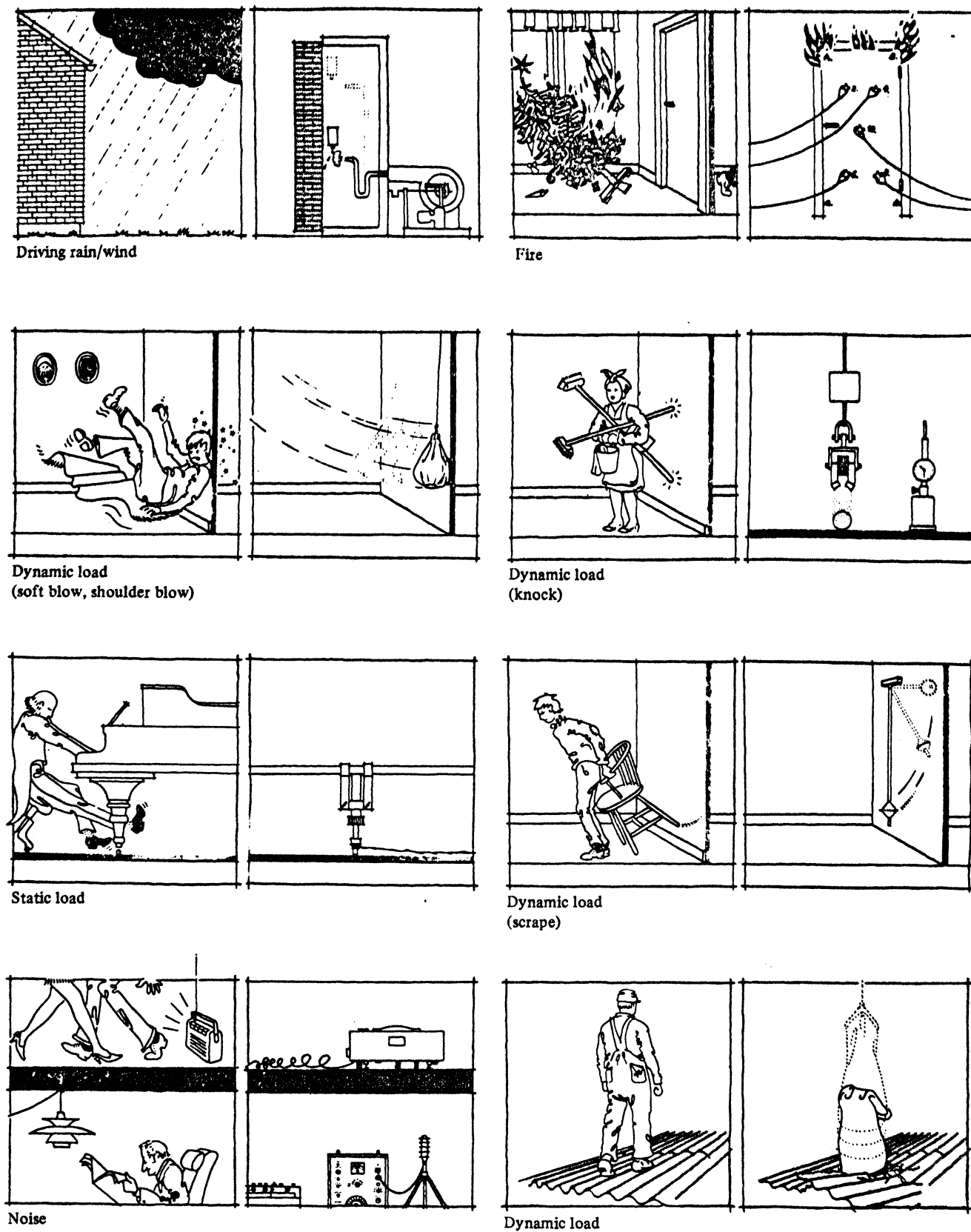


FIG. 3.9 – Exemples de contraintes pour lesquelles il existe des méthodes de tests similaires
(source : CIB/W060 Publication 64, 1982, p.15, figure13)


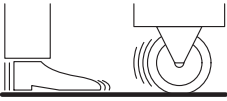


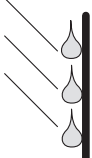
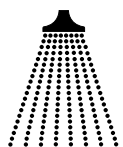




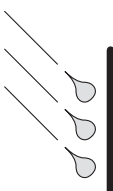
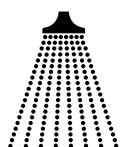




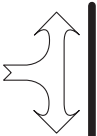

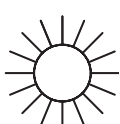
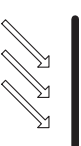
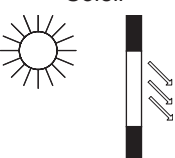
Meso-Env. extérieur (Milieu extérieur)	Micro-Env. (Contrainte)	Meso-Env. intérieur (Milieu intérieur)
Usagers / véhicules 	Usure mécanique 	Usagers 
Pluie 	Délavage 	Douche 
Grêle / Usagers 	Chocs / Poinçonnement 	Usagers 
Pluie / Neige 	Mouillage 	Douche 
Trafic, industrie 	Polluants 	Fumée 
Vent 	Courants d'air 	Ventilation 
Soleil 	Lumière 	Soleil 

FIG. 3.10 – Correspondances entre Meso-Environnement et Micro-Environnement

3.8 Rôles **E**

Dans le paragraphe 3.1 les fonctions ou *Rôles* ont été définis comme étant des tâches à accomplir par l'élément de construction afin que l'ensemble du bâtiment puisse satisfaire aux exigences requises. Le lien entre les *Rôles* et les *Performances* se fait par l'introduction de valeurs limites appelées *Exigences*. Ainsi un *Rôle* peut être accompli tant que la *Performance* correspondante n'a pas franchi son *Seuil d'exigence*.

Les fonctions ou rôles d'un élément de construction peuvent être multiples et dépendent de sa situation dans le bâtiment ainsi que des sollicitations auxquelles celui-ci est soumis.

Ci-après, les différents types de rôles sont décrits :

Être étanche à l'air

Un élément de construction doit être étanche à l'air pour éviter des courants d'air non désirés dans les locaux habités. Ces courants créent un inconfort pour les habitants soit par une vitesse d'air trop élevée, soit par des infiltrations d'air froid en saison hivernale. Ce rôle est également requis pour éviter des pertes thermiques par ventilation.

Dans certains types de construction, cette fonction est automatiquement remplie lorsque la couche porteuse forme une couche monolithique telle que les murs en béton ou en brique. Dans d'autres cas, comme les façades ou toitures assemblées en bois, ce rôle est assuré par une couche spécifique, p.ex. une feuille étanche à l'air.

Dans tous les cas, une étanchéité à l'air est requise pour des éléments séparant un milieu chauffé d'un milieu non-chauffé. Dans d'autres configurations, la présence de ce rôle dépend d'exigences particulières.

La performance associée à ce *Rôle* est l'*Étanchéité à l'air* dont le seuil d'exigence dépend de l'intensité des courants d'air des deux milieux.

Être transparent et Être étanche à la lumière

Le rôle *Être transparent* s'applique aux éléments transparents tel que fenêtres, vitrages, verrières et autres. Ces éléments doivent permettre le passage de la lumière et la vue à travers tout l'élément. Ce rôle est rempli tant que la performance de transparence globale du composant est en dessus d'une valeur limite. La transparence globale se calcule en multipliant les performances de transparence des couches selon la relation suivante :

$$\tau_{gl} = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \dots \cdot \tau_N = \prod \tau_i \quad (3.5)$$

Dans certains cas, l'absence de transparence ou *Être étanche à la lumière* peut être demandé.

Être étanche à l'eau

Pour assurer qu'un milieu reste "au sec", même en cas de présence d'eau de l'autre côté du composant, ce dernier doit *Être étanche à l'eau*. La plupart du temps, ce rôle est requis pour des éléments d'enveloppe séparant un milieu extérieur ou enterré d'un milieu intérieur. Mais il existe d'autres éléments qui doivent être étanche à l'eau tels que les toitures de couverts, des dalles de balcon, des murs et fonds de piscines, des murs de soutènement etc.

L'exigence ou le degré d'étanchéité demandé dépend de l'intensité de la sollicitation attendue dans le milieu humide. En effet, un élément vertical soumis à l'eau de pluie peut avoir des passages d'air pour autant que l'écoulement de l'eau par gravité soit assuré. Ceci sauf si on est en présence d'eau permanente comme cela peut être le cas pour des milieux enterrés, sur des toitures plates ou dans des bassins d'eau. A ce moment, l'élément étanche doit être continu et pouvoir, le cas échéant, résister à une pression d'eau donnée.

L'eau étant à la base de la plupart des phénomènes de dégradation tels que pourriture, efflorescences, dégâts

du au gel, corrosion, etc., il est important de rappeler que le rôle *Être étanche à l'eau* se limite à la capacité du composant d'empêcher les infiltrations d'eau dans le milieu sec. Il ne tient pas compte d'éventuelles infiltrations partielles pouvant avoir des conséquences sur d'autres rôles ou sur la dégradation du composant même.

Être isolant thermiquement

Un élément doit *Isoler thermiquement* lorsqu'il sépare un milieu chauffé d'un milieu non-chauffé. Ceci d'une part pour limiter les déperditions de chauffage ou les risques de surchauffe en été (combles), d'autres part pour éviter la formation de moisissures à la surface intérieure de l'élément. Ces moisissures peuvent apparaître lorsque la température de surface descend régulièrement en dessous du point de rosée favorisant ainsi l'humidification de la surface par la condensation.

Dans les bâtiments modernes, construits sous nos latitudes, les éléments d'enveloppe doivent en plus respecter une conductance thermique (valeur U) minimale pour répondre aux exigences légales en matière de consommation d'énergie. Cette valeur se calcule par addition des Résistances thermiques de toutes les couches ($R_{thGL} = \sum R_{th_i}$). Toutefois, bien que toutes les couches "participent" à l'isolation thermique, il s'avère que pour atteindre des valeurs U de $0.3[\text{W/m}^2\text{K}]$ ou inférieures, au moins une des couches doit être constituée d'un matériau dit *isolant* avec une conductibilité thermique λ inférieure à $0.1[\text{W/mK}]$.

Avoir une résistance statique

Pour maintenir sa position et sa forme, c.-à-d. assurer la pérennité de l'espace, les éléments de construction doivent résister à diverses charges statiques. Ceci dit, tout élément de construction n'étant pas posé à plat sur le sol doit au moins porter son propre poids. Cette caractéristique exige pour pratiquement chaque composant une stabilité structurelle. Dans une construction multicouche, certaines couches se portent elles-mêmes alors que d'autres sont "accrochées" à des couches support avec des fixations mécaniques ou par collage.

Être résistant à l'usure

Chaque élément est, d'une manière ou d'une autre, sollicité par des agents abrasifs. Le niveau de résistance doit être supérieur au niveau de sollicitation afin d'éviter une usure prématurée.

Le *Résistance à l'usure* globale d'un composant dépend de la performance *Résistance à l'usure* des deux couches externes étant en contact direct avec les milieux environnants.

Être résistant aux chocs et au poinçonnement

Pour protéger des couches assurant l'étanchéité à l'eau ou à l'air contre la perforation, la résistance aux chocs et au poinçonnement doit être plus grande que la "force" des chocs ou impacts attendus.

Les matériaux filmogènes tels que les peintures, les étanchéités etc. étant normalement collés ou fixés sur des couches de supports, sont les plus vulnérables. Leur *Résistance aux chocs et au poinçonnement* dépend dans une grande partie de la résistance de leurs couches-support. De cette façon, la *Résistance aux chocs et au poinçonnement* globale du composant est en principe assurée par la première couche non filmogène depuis l'extérieur.

Avoir un aspect de surface

Le rôle d'*aspect* représente la qualité visuelle de l'élément de construction. Ce rôle, étant généralement assuré par les deux couches périphériques de l'élément, n'est pas technique mais esthétique. Même si la détérioration de l'aspect n'a, dans bien des cas, aucune influence sur le *fonctionnement* correct de l'élément, elle est souvent un facteur décisionnel important. Les bâtiments ayant aussi des rôles représentatifs pour leurs propriétaires ou locataires, ces derniers peuvent être amenés à décider une réfection lorsque uniquement l'esthétique de certains éléments est jugée trop dégradée.

3.9 Type d'élément et Exigences **F**

Quels rôles, parmi ceux énumérés ci-dessus, un élément de construction doit-il remplir ? Cela dépend à la fois du type de sollicitations auquel il est soumis et aux *exigences de séparation* d'un milieu vis-à-vis de l'autre.

L'attribution de rôles à un composant ainsi que les exigences qui y sont associées peuvent être définies à partir du type de l'élément, le type d'élément lui-même étant déterminé en fonction des deux milieux de part et d'autre ainsi que de l'inclinaison du composant.

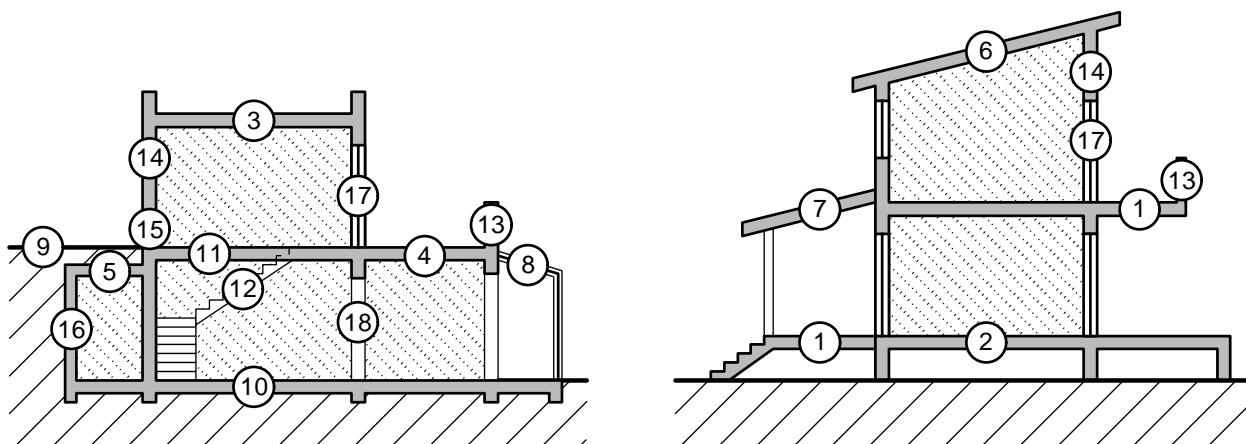


FIG. 3.11 – Le type d'élément dépend de sa position dans le bâtiment
Signification des numéros, voir figure 3.12

La figure 3.11 montre schématiquement la position de divers éléments dans le bâtiment. Leur dénomination ainsi que les rôles qui doivent leur être attribués sont présentés en figure 3.12.

Pour classifier les types d'éléments de manière systématique, il est possible de les distinguer par rapport aux situations d'exposition des deux faces ainsi que par leur inclinaison. La figure 3.13 présente une classification de divers *type d'éléments* selon trois types de milieux (extérieur, intérieur et souterrain) ainsi que trois inclinaisons (horizontal, en pente et vertical⁹). On peut constater que pour une même situation, parfois il est encore nécessaire de faire la différence entre un milieu extérieur *occupé* et un milieu *non-occupé*. Ceci est le cas pour distinguer une toiture-plate d'une toiture-terrasse ou une toiture en pente d'un escalier extérieur en dessus d'un local. Parmi les 27 cas énumérés, il y a également des situations étant très rares mais néanmoins possibles. Ainsi des murs et dalles enterrés, des dalles de soutènements ou des toitures enterrées sont plutôt des cas d'exception.

Exigences

Comme nous avons vu au paragraphe 3.4, la détermination de la durée de vie se fait par comparaison des courbes de performance avec des seuils critiques. La valeur de ce seuil est aussi appelée *Seuil de défaillance* ou *Exigence*.

Le niveau minimal exigé d'une performance dépend de la nature du rôle associé ainsi que du type d'élément. Il peut être défini selon un des trois principes suivants :

- Le seuil est défini selon une exigence absolue ($P \geq P_{lim}$). On trouve ce type d'exigences lorsqu'il s'agit de remplir des rôles dictés par la législation tel que p. ex. l'isolement thermique (valeur-U).

⁹Le document EOTA (1999), *Assessment of working life of products* distingue également ces trois situations d'exposition pour classifier les facteurs de dégradation.

Groupe	No	Nom	Pente	Conditions	Rôles							
					Et. à l'air	Et. à l'eau	Isol. thermique	Stab. statique	Transparence	Res. à l'usure	Rés. aux chocs	Aspect
Eléments inclinés et horizontaux	1	Balcon	0°	Elément entre deux milieux extérieurs		x		x		x	x	x
	2	Plancher sur vide	0°	Elément entre un milieu intérieur et un milieu extérieur	x	x	x	x		x	x	x
	3	Toiture plate	0°	Elément entre un milieu extérieur non occupé et un milieu intérieur	x	x	x	x		x	x	
	4	Terrasse	0°	Elément entre un milieu extérieur occupé et un milieu intérieur	x	x	x	x		x	x	x
	5	Toiture enterrée	0°	Elément entre un milieu extérieur occupé et un milieu intérieur	x	x	x	x				
	6	Toiture en pente	15° - 45°	Elément entre un milieu extérieur et un milieu intérieur	x	x	x	x		x	x	x
	7	Toiture en pente ext.	15° - 45°	Elément entre deux milieux extérieurs		x		x			x	x
	8	Verrière	0° - 45°	Elément transparent entre un milieu intérieur et un milieu extérieur	x	x	x	x			x	
	9	Circulation extérieure	0° - 45°	Elément entre deux milieux extérieurs dont un enterré		x				x	x	
	10	Dallage enterré	0° - 45°	Elément entre un milieu extérieur enterré et un milieu intérieur		x	x	x		x	x	x
	11	Plancher	0° - 15°	Elément entre deux milieux intérieurs	x	x	x	x		x	x	x
	12	Escalier	30° - 45°	Elément entre deux milieux intérieurs		x		x		x	x	x
Eléments verticaux	13	Mur extérieur	90°	Elément entre deux milieux extérieurs				x		x	x	x
	14	Façade	90°	Elément entre un milieu extérieur et un milieu intérieur	x	x	x	x		x	x	x
	15	Soubassement	90°	Elément de façade à moins d'un mètre en-dessus du sol	x	x	x	x		x	x	x
	16	Mur enterré	90°	Elément dont un milieu est ext et enterré		x	x	x				x
	17	Vitrage	90°	Elément transparent entre un milieu extérieur et un milieu intérieur	x	x	x	x	x		x	
	18	Cloison	90°	Elément entre deux milieux intérieurs	x	x		x		x	x	x

FIG. 3.12 – Attribution des rôles en fonction du type d'élément

Les éléments sont représentés en figure 3.11

- La perte de performance acceptable s'exprime en pourcent de la performance initiale ($P \geq k \cdot P_{t=0}$). Ce seuil relatif à la valeur de départ peut être appliqué à des rôles d'aspect ou de transmission lumineuse.
- La Performance doit être supérieure à la contrainte correspondante ($P \geq C_0$). Ce type d'exigence est applicable pour des étanchéités à l'eau ainsi qu'à l'air, pour assurer que les contraintes ne peuvent traverser le composant

Le chapitre 4.2.1 (page 77) décrira l'application de ces règles dans le modèle en détail.

<div>Milieu A</div> <div>Milieu B</div>	<div>Milieu intérieur</div> <div></div>	<div>Milieu extérieur</div> <div></div>	<div>Milieu enterré</div> <div></div>
<div>Milieu intérieur</div> <div></div>	<div></div> <div>Plancher</div> <div></div>	<div></div> <div>Toit plat Terrasse</div> <div></div>	<div></div> <div>Toit enterré</div> <div></div>
	<div></div> <div>Rampe Escalier int.</div> <div></div>	<div></div> <div>Toit en pente Rampe Escalier ext.</div> <div></div>	<div></div> <div>Toit enterré</div> <div></div>
	<div></div> <div>Cloison</div> <div></div>	<div></div> <div>Façade Soubassement</div> <div></div>	<div></div> <div>Mur contre terre</div> <div></div>
<div>Milieu extérieur</div> <div></div>	<div></div> <div>Plancher sur vide</div> <div></div>	<div></div> <div>Balcon Toit plat ext.</div> <div></div>	<div></div> <div>Dalle de soutènement</div> <div></div>
	<div></div> <div>Plancher sur vide</div> <div></div>	<div></div> <div>Toit en pente ext. Rampe ou Escalier ext.</div> <div></div>	<div></div> <div>Dalle de soutènement</div> <div></div>
	<div></div> <div>Façade Soubassement</div> <div></div>	<div></div> <div>Mur ext.</div> <div></div>	<div></div> <div>Mur de soutènement</div> <div></div>
<div>Milieu enterré</div> <div></div>	<div></div> <div>Plancher sur terre</div> <div></div>	<div></div> <div>Circulation ext.</div> <div></div>	<div></div> <div>Dalle enterré</div> <div></div>
	<div></div> <div>Plancher sur terre</div> <div></div>	<div></div> <div>Circulation ext. Rampe Escalier</div> <div></div>	<div></div> <div>Dalle enterré</div> <div></div>
	<div></div> <div>Mur contre terre</div> <div></div>	<div></div> <div>Mur de soutènement</div> <div></div>	<div></div> <div>Mur enterré</div> <div></div>

FIG. 3.13 – Classification des types d'élément d'après leur situation d'expositions et leur inclinaison

Chapitre 4

Modèle

Ce chapitre décrit la façon dont les concepts, introduits au chapitre précédent 3 - MÉTHODE, ont été utilisés pour créer un modèle dans le cadre du développement d'un outil informatique. Après une présentation de la technique de programmation utilisée et des différentes parties du modèle nous revenons sur l'implémentation de la *variation des performances*, de la *propagation des contraintes* et des *rôles et exigences*. Ceci pour expliquer comment ces principes ont trouvé une application concrète. Les définitions ainsi que les descriptions des contraintes et des performances se trouvent dans les chapitres suivants (5 et 6)

Modélisation par programmation orientée objet

Lors du développement du logiciel AMB, des bases de données comme *Oracle* ou *Hypercard* ont d'abord été utilisées pour effectuer la simulation¹. Finalement, les programmeurs ont eu recours à la *Programmation Orientée Objet* (POO), ce qui a permis d'exploiter deux principes utilisés dans la programmation moderne qui sont l'*encapsulation* et l'*héritage de type*.

L'*encapsulation*, c.-à.-d. la possibilité de confiner toutes les caractéristiques et comportements des composants du modèle dans des objets spécifiques, a permis un développement structuré et hiérarchisé du logiciel de simulation. Ainsi toute la structure du programme et les liens entre les divers composants ont pu être mis en place sans devoir connaître à l'avance le comportement exact de chaque composant. Une fois cette structure établie et opérationnelle, les modèles spécifiques aux différents composants ont pu être développés, testés et corrigés sans intervenir sur le programme de base. La figure 4.1 montre schématiquement l'organisation du modèle de simulation ainsi que ses composants principaux.

Avec la technique d'*héritage*, les différentes caractéristiques et comportements des divers matériaux peuvent aisément être modélisés. Cette technique permet de décliner tous les objets-matériaux, par une ou plusieurs *générations*, à partir d'un ancêtre commun. Ainsi les objets-enfants peuvent soit hériter des caractéristiques de leurs ancêtres, soit adopter des comportements qui leur sont propres. Dans le deuxième cas, il suffit d'adapter les paramètres et de modifier les règles de simulation de l'objet-matériau en question. Par cette technique d'*héritage*, le comportement d'un objet-matériau est une combinaison entre le comportement commun à une famille de matériaux et son comportement spécifique. Le choix de décrire les comportements des matériaux non pas par des tables tel que cela ce fait avec des bases de données mais de créer des objets informatiques à part entière a également permis d'introduire des mécanismes et algorithmes spécifiques à des matériaux au lieu et place de simples paramètres.

Pour chaque configuration d'élément de construction, l'outil crée un modèle adéquat. Ainsi, le composant désiré est constitué par un assemblage d'objets *Matériaux* issus d'une bibliothèque de classes-matériaux. A ce modèle sont également associés des données concernant les milieux des deux côtés du composant.

La simulation proprement dite, c.-à.-d. l'évolution du comportement de l'élément à travers le temps, s'effectue par une boucle itérative dans laquelle les objets recalculent et mettent à jour leurs paramètres à chaque cycle².

¹Voir aussi paragraphe C.1.

²voir paragraphe 4.2.

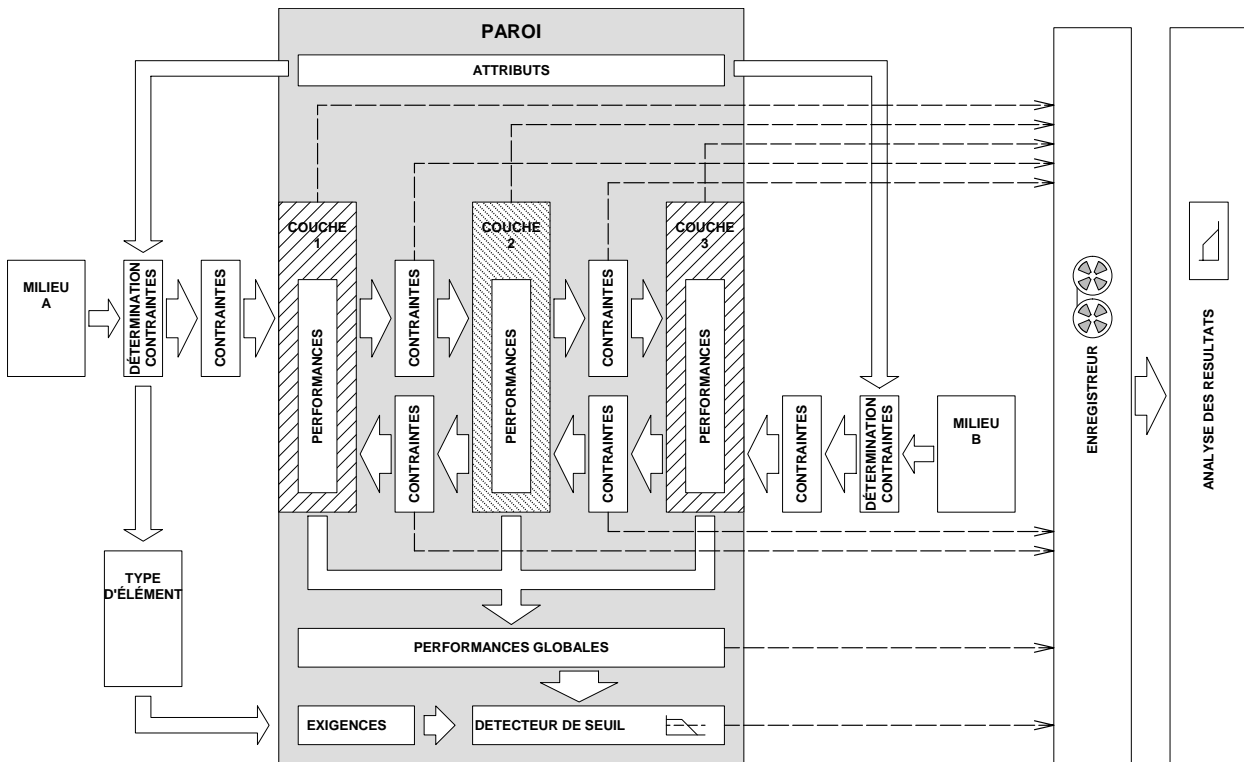


FIG. 4.1 – Différents composants du modèle

La figure 4.1 montre les différentes parties du modèle ainsi que les liens et le flux des informations pendant la simulation.

4.1 Objets du modèle

Le cœur du modèle est constitué par un *Objet-Paroi* (partie A) représentatif pour l'élément de construction. Cet objet s'adapte en fonction de la composition de l'élément et gère les algorithmes de dégradation. Pour pouvoir effectuer l'ensemble des tâches, il contient d'autres objets, responsable chacun d'une partie spécifique de la simulation. Ce sont :

- Les objets *Couche*, représentant chacun une couche de l'élément.
- Un objet *Elément*, contenant les données et règles pour déterminer les rôles et exigences que l'élément doit remplir.
- Les objets *Contraintes*, dans lesquelles les contraintes agissant sur les surfaces de la paroi ainsi que les contraintes transmises d'une couche à l'autre sont stockées.

De chaque côté de l'objet *Paroi*, deux objets *Milieu* représentent les conditions de l'environnement de part et d'autre de l'élément.

L'objet *Rôles* regroupe les rôles ainsi que les critères de défaillance associés à chaque rôle. Sa fonction est la surveillance des performances des *Couches* et de la *Paroi*. Il génère également des événements d'avertissement lorsque les exigences minimales ne sont plus remplies. Le dernier module, l'*Enregistreur* sert à l'enregistrement et à la présentation des résultats.

Les différents modules sont illustrés dans la figure 4.2 et leur fonctionnement est décrit dans les paragraphes suivants.

4.1.1 Objet-Paroi

L'*Objet-Paroi* représente l'élément de construction soumis à la simulation. Pour décrire ce dernier, l'*Objet-Paroi* doit connaître quelques caractéristiques générales qui sont stockées dans les *Attributs* ainsi que la composition des différentes couches qui se trouvent dans la *Liste des couches*.

Dialogue Paroi

Nom de la paroi:

Année de construction:

Milieu A:

Couches:

Nom	Ep. [mm]
Bardage Bois	20.00
Sous-construction	60.00
Isolation	100.00
Mur porteur	180.00
Lissage	10.00
Peinture intérieure	0.15

Poids= 265.18 [kg/m3] Ep. Total: 370.15

Milieu B:

Valeur U= 0.31 [W/m2K]

Pente [deg]:

Type d'élément:

Cour d'immeuble

Séjour- Chambre

Orientation:

☐ Nord
☐ Est
☒ Sud
☐ Ouest

Etage:

☐ > 8
☐ 4 à 8
☐ Rez (>1m du sol) à 3
☒ Rez (<1m du sol)
☐ Sous-sol

Protections contre:

☐ Soleil ☐ Eau
☐ Vent ☐ Chocs
☐ Pluie

FIG. 4.3 – Fenêtre Paroi du logiciel de simulation

a) Les *Attributs* de la paroi sont :

- *Type d'élément* : Ce paramètre décrit quel type d'élément le composant représente. Il est utilisé pour déterminer les contraintes mais aussi pour définir les rôles que le composant doit remplir et les exigences associées à chaque rôle. Le type d'élément peut aussi être déterminé de manière automatique à partir des autres données générales en combinaison avec les caractéristiques des milieux environnants
- La valeur *Altitude*, exprimée en mètres, est principalement utilisée pour déterminer la température minimale en hiver à l'extérieur.
- L'attribut *Orientation* définit l'orientation de la Face A de l'élément de construction. Pour des questions de simplification, le modèle distingue actuellement uniquement entre les 4 points cardinaux (Nord, Est, Sud, Ouest).
- L'*inclinaison* ou *pente* définit l'angle de l'élément par rapport à un plan horizontal. Pour le moment, uniquement les angles 0°, 15°, 30°, 45° et 90° sont pris en compte.
- La *hauteur en dessus du sol* a également une influence sur certaines contraintes. On distingue entre 5 catégories
 - plus de 8 étages
 - 4 à 8 étages
 - de 1m du sol à 3 étages
 - de 0 à 1m du sol
 - sous le niveau du sol (saut de loup etc.)
- Dans certains cas, l'élément se trouve dans une situation telle que les actions d'un ou plusieurs des agents ne peuvent l'atteindre. Le modèle peut tenir compte de ces protections par les paramètres suivants :
 - présence d'une *protection contre le rayonnement solaire*
 - présence d'une *protection contre le vent*
 - présence d'une *protection contre la pluie*
 - présence d'une *protection contre l'arrivée d'eau*

- présence d'une *protection contre des chocs mécaniques*

Lorsque l'une ou l'autre de ces protections est activée, la contrainte correspondante est initialisée avec un niveau 0.

b) *Liste des couches*

Les différentes couches de l'élément de construction sont modélisées chacune par un *Objet-Couche* dont le type correspond au matériau de la couche.

En plus, le module *Paroi* contient également des parties uniquement actives pendant la simulation telles que :

c) *Listes des contraintes*

Comme mentionnée dans le chapitre 3 *Méthode*, les contraintes se propagent à travers l'élément de construction dans les deux directions, du *Milieu A* vers le *Milieu B* et vice-versa. *Contraintes A* et *Contraintes B* sont les deux listes regroupant ces actions, la première les actions venant de la face A allant vers B, la deuxième celles venant de la face B allant vers A. Les objets *Contraintes* sont créés automatiquement d'après le nombre de couches. Les valeurs de contraintes agissant sur les couches périphériques *ContrA₀* et *ContrB₀* sont déterminées à partir des données des milieux adjacents (*Milieu A* et *Milieu B*) en combinaison avec le type d'élément et des données générales de la paroi (x). Les contraintes internes *ContrA_{1..N}* et *ContrB_{1..N}* sont recalculées par les objets *Couche* à chaque itération d'après les règles de propagation.

d) *Performances globales*

Certains critères de performances de l'élément de construction se basent sur des *Performances globales* de la *Paroi* (voir chapitre 3.8 - Rôles). Ces *Performances globales* sont mises à jour à partir des performances des couches à la fin de chaque cycle de calcul.

La manière de calculer ces *Performances globales* peut différer d'une performance à l'autre. Elle peut prendre en compte l'ensemble des couches ou seulement une ou deux couches spécifiques.

Ainsi la valeur U de l'élément est calculée par l'addition des résistances thermiques de toutes les couches. L'aspect général par contre dépend uniquement des couches périphériques. Pour l'étanchéité à l'eau ou à l'air, la performance globale équivaut à la performance de la couche, la plus étanche.

e) *Milieu A et Milieu B*

Pour définir les caractéristiques des deux environnements entre lesquels le composant est placé, l'*objet-paroi* contient également les liens vers les objets *Milieu A* et *Milieu B*.

4.1.2 Objets-Couche ou Objets-matériau

La composition des différentes couches de l'élément est gérée par une liste d'*objets-couche* dont l'objet-paroi est propriétaire. Le type de chaque *objet-couche* correspond au matériau qu'il représente. Il connaît ainsi les caractéristiques et le comportement de son matériau et peut gérer de manière indépendante l'évolution de ses performances en fonction des contraintes entrantes.

Pour pouvoir offrir à l'utilisateur de l'outil la possibilité de modéliser des éléments de construction constitués d'une multitude de matériaux différents, une série de classes-enfants a été dérivée à partir de la *classe de base*³. Chaque classe-enfant correspondant à un matériau ou à une famille de matériaux spécifique, contient les règles de dégradation et de propagation de ce dernier.

Ainsi, la définition de la matérialité de l'élément à analyser se fait par la définition des différentes couches. Pour chaque couche, on doit d'abord choisir le matériau et ensuite le configurer. Le paramètre principal à introduire est l'épaisseur. Il s'agit de l'épaisseur initiale à l'état neuf qui permettra d'initialiser la performance *Epaisseur*. Pour certaines classes-matériau, des paramètres supplémentaires permettent de nuancer leur comportement en précisant p.ex. la qualité, le type de joints, l'application de traitements particuliers

³La construction des quelques classes est décrite en annexe A.

etc. L'influence de ces facteurs sur les divers matériaux est décrite au chapitre A.

La liste des performances est également intégrée à l'objet-matériau pour les besoins de la simulation. La *classe de base* contient 12 performances qui sont communes à toutes les classes-matériaux. Un aperçu de ces performances est donné dans le tableau 4.1 et leur description détaillée au chapitre 6 *Performances*.

Nom	Signification
Epaisseur	Epaisseur de la couche
Absorption Chocs	Faculté de freiner la progression d'impacts
Etanchéité à l'eau	Faculté de freiner la progression d'eau
Etanchéité à l'air	Faculté de freiner la progression de courants d'air
Etanchéité au CO ₂	
Etanchéité à la lumière	Faculté de freiner la progression de la lumière
Résistance statique	Faculté d'assurer une stabilité structurelle de l'ensemble
Résistance à l'usure	Faculté de résister à l'abrasion par usure mécanique
Résistance aux chocs	Faculté de résister aux chocs sans se casser ou se déformer
Résistance au poinçonnement	Faculté de résister aux impacts sans altérer la surface
Résistance à la corrosion	Faculté de résister aux agents corrosifs
Résistance au délavage	Faculté de résister à l'abrasion par l'eau en mouvement
Résistivité thermique	Inverse de la conductivité thermique λ_{th}
Résistivité à la diffusion de vapeur d'eau	Inverse de la conductivité à la vapeur λ_v
Résistivité à la diffusion de CO ₂	
Aspect	Aspect esthétique du matériau
Etat de surface	Rugosité de la surface
Valeur pH	Potentiel hydrogène du matériau

TAB. 4.1 – Performances intégrées dans l'objet-matériau de base

Certaines classes-enfants peuvent avoir des performances spécifiques supplémentaires. Ainsi par ex. pour les matériaux hydrauliques, une performance *Taux de carbonatation* a été introduit pour tenir compte des phénomènes de carbonatation.

Classes de matériaux

Pour profiter des possibilités offertes par la *Programmation Orientée Objet*, les différents matériaux ont été classés dans une structure en forme d'arborescence.

La hiérarchie des classes a été déterminée par une classification des matériaux selon leur nature. La figure 4.4 montre l'arborescence des matériaux telle qu'elle a été prévue pour la simulation.

Au premier niveau hiérarchique, on trouve diverses familles de matériaux de construction. Ainsi, les métaux sont séparés en deux familles ; les *métaux ferreux* ainsi que les *métaux non-ferreux*. Parmi les matériaux minéraux, on trouve la famille des *pierres*, les *matériaux à liant hydraulique*, les *céramiques*, les *terres-cuites*, les *plâtres* et les *verres*. Les familles des *bois*, des *bitumineux*, des *mastics*, *mousses* et *matières polymères* ainsi que les *peintures organiques* représentent les divers matériaux organiques. Dans la famille des *agglomérés*, on distingue globalement entre les *agglomérés liés au ciment* et les *agglomérés à liant organique*. La dernière famille, les *couches d'air*, regroupe les diverses formes de couches d'air que l'on peut trouver dans les systèmes constructifs.

Le deuxième niveau représente principalement les matériaux proprement dits, avec toutefois quelques exceptions. Ainsi, dans les hydrauliques, il a été décidé de distinguer entre plusieurs matériaux à base de

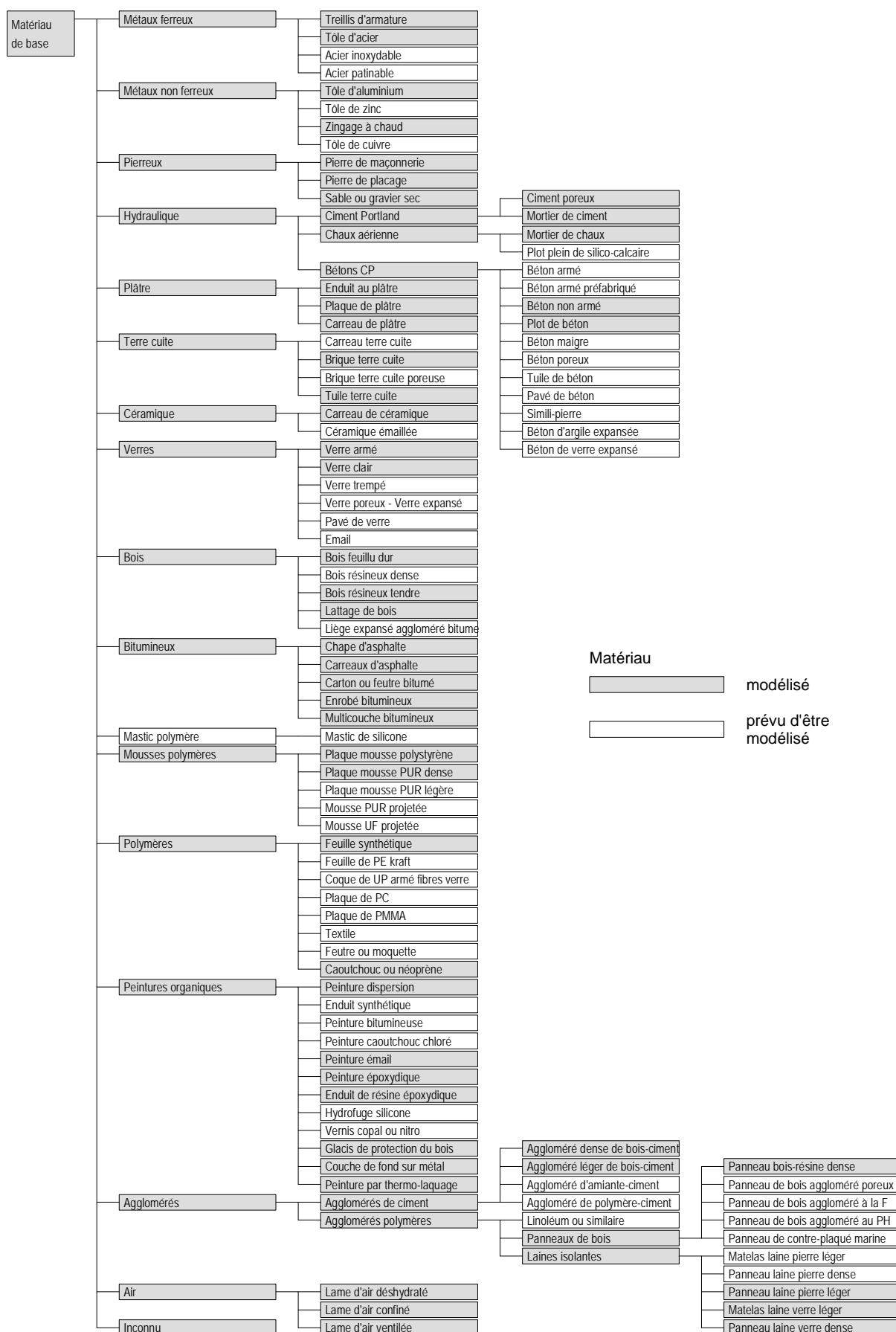


FIG. 4.4 – Arborescence des classes de matériaux

ciment Portland, de chaux aérienne et de béton de ciment Portland (CP). Aussi dans les agglomérés à liant organique, on distingue plusieurs types de panneau de bois ainsi que différentes formes de laines isolantes.

Pour permettre une simulation partielle des couches, une classe *inconnu* (tout en bas de l'arborescence) a également été introduite. Etant à la fois étanche et insensible à toute forme de sollicitation, elle représente, d'une certaine façon, un matériau idéal. La mise à disposition de ce type de matériau virtuel a été jugée intéressante car elle permet la modélisation de parois dont on ne connaît pas exactement la composition. Cette option est nécessaire lorsqu'on est amené à analyser une construction existante sans pouvoir faire des sondages pour déterminer la nature de chaque couche. Ce matériau constitue également une barrière idéale aux contraintes. Ensuite, placé au centre d'une suite de couches de matériaux, le matériau *inconnu* arrête la propagation de toute contrainte. Ainsi les couches périphériques ne sont pas soumises aux contraintes de la face opposée et leur comportement peut être évalué uniquement sur la base des contraintes d'une seule face.

La description de quelques classes-matériaux se trouve en annexe A - *Classes de matériaux*.

Liste de performances

Afin d'offrir un maximum de flexibilité pour le développement et l'application du logiciel de simulation, les performances ont également été implémentées par des objets-performance spécifiques. Ces objets sont en mesure de gérer plusieurs tâches à différents moments de la simulation. Les divers paramètres et variables utilisés pour l'initialisation et la gestion sont :

- la *Variable aléatoire* est définie par le type de distribution, la valeur moyenne et la déviation standard. Lors de l'initialisation des essais, elle détermine la valeur initiale de la performance à l'aide d'un dé électronique (voir paragraphe 4.4). Dans le cas d'une simulation avec des paramètres discrets, c'est la moyenne qui est directement attribuée à la performance initiale.
- la *Valeur* est la variable qui représente l'état actuel de la performance. Elle est initialisée avant un essai et mise à jour à chaque cycle par l'objet-matériau selon ses propres règles de *Variation de performance*.
- les propriétés *Min* et *Max* indiquent les valeurs limites de la performance. Elles sont définies en fonction du type d'échelle de la performance et assurent que la *Valeur* reste dans un certain intervalle lorsque cette dernière est mise à jour pendant la simulation.
- La propriété *Enregistrements* crée un lien avec la piste d'enregistrement sur l'enregistreur. Ainsi, après chaque cycle de calcul, la *Valeur* de la performance est sauvegardée et peut être rappelée lors des analyses ultérieures pour des animations ou pour tracer des courbes.
- La classe-performance contient également d'autres propriétés qui servent à l'analyse ultérieure. Ce sont le *nom* de la performance, les *attributs de trait* pour dessiner la courbe dans un graphique ainsi qu'un lien vers l'objet graphique représentant la performance sur l'écran.

L'ensemble des objets-performance est géré par la liste de performances de l'objet-matériau.

4.1.3 Objets-Milieu

Sur chaque face, l'*objet-paroi* est connecté à un *objet-milieu* qui contient les données liées au meso-environnement. Ces objets ont été introduits pour permettre à l'utilisateur de décrire les caractéristiques des deux environnements de manière simple. L'*objet-paroi* les utilise pour déterminer les contraintes périphériques $C_{A,0}$ et $C_{B,0}$ en combinaison avec ses caractéristiques générales.

Lors de l'énumération des agents influençant le bâtiment (voir tableau 5.2), la norme ISO 6241 :1984, distingue entre des agents d'origine externes ou internes au bâtiment. Ceci car la nature et l'intensité des sollicitations des deux origines varient fortement. De même que dans la norme ISO, cette distinction se fait dans la modélisation par l'utilisation de deux types d'*objets-milieu*, les *Milieux extérieurs* et les *Milieux intérieurs*. Les deux types d'*objets-milieu* ont certains paramètres en commun et d'autres spécifique à leur nature.

Paramètres communs

Les *données hygrothermiques* soit la température, l'humidité relative et la conductivité thermique de la couche limite⁴, sont des paramètres qui sont utilisés dans les deux types de milieu. Les valeurs utilisées sont celles de la période la plus froide de l'année. Ceci pour pouvoir détecter des problématiques liées à la condensation ou aux dégradations provoquées par le gel.

La *Fréquentation* est un autre facteur d'influence commun. Elle permet de définir la durée d'occupation, c.-à-d. donner une indication si le lieu est fréquenté souvent ou non. Pour ce faire, le modèle propose 4 niveaux d'occupation dont la signification est montrée dans le tableau 4.2.

Catégorie	Occupation [h/jour]	Milieux typiques	
		Extérieur	Intérieur
Nulle	0	Toitures non accessibles, façades avec $h > 2\text{m}$, sols	Combles non accessibles
Occasionnelle	0 - 3	Cours d'immeuble, circulation ext.	Caves, ascenseurs, combles, couloirs, WCs, locaux techniques
Moyenne, passante	3 - 8	Rues, parcs	Séjours, cuisines
Fréquenté, trafic, foule	≥ 8	Artères, zones piétonnes	Lieux de travail

TAB. 4.2 – Catégories du paramètre *Fréquentation*

Milieux extérieurs

L'*objet-milieu extérieur* est utilisé pour les lieux ouverts, directement en contact avec les conditions climatiques et d'utilisations extérieures telles que les intempéries, de fortes variations de température, le rayonnement solaire, la pollution extérieure, le trafic etc. Pour ces objets, en plus des paramètres communs, d'autres, plus spécifiques aux conditions extérieures, ont été ajoutés.

Le paramètre *Type d'environnement* permet de distinguer entre diverses natures d'occupation qui ont des impacts sur la pollution de l'air. Le tableau 4.3 décrit les différents états de ce paramètre.

Catégorie	Description
Calme, isolé	Lieu calme, isolé sans trafic, campagne, parc
Zone tranquille, habitat	Lieu avec peu de circulation
Rue	Lieu avec circulation normale
Carrefour	Lieu avec passablement de circulation
Artère, industrie, ferroviaire	Lieu avec des sources de pollution importantes

TAB. 4.3 – Catégories d'*Environnement*

Pour tenir compte de nuisances ou conditions particulières diverses options peuvent être sélectionnées. Ce sont :

- *Polluants* : option indiquant une présence particulièrement élevée de polluants dans l'air.
- *Corrodants* : option indiquant la présence d'agents corrodants dans l'air ou dans le sol.
- *Immergé* : option indiquant la présence d'eau en permanence.
- *Enterré* : option indiquant s'il s'agit d'un milieu enterré.

L'option *Enterré* permet également de tenir compte de situations d'exposition souterraine⁵. Logiquement,

⁴Couche limite : zone d'air proche de la surface.

⁵Pour décrire les facteurs de dégradation, le document EOTA (1999) énumère dans le tableau 1.3 également les agents venant situations d'exposition souterraines.

l'activation de cette option doit annuler toute forme d'occupation car ces endroits sont inaccessibles.

La figure 4.5 montre la fenêtre du logiciel permettant de configurer un milieu extérieur. A titre d'exemple, le tableau 4.4 indique la configuration pour quelques environnements extérieurs.



FIG. 4.5 – Interface utilisateur - *Milieu extérieur*

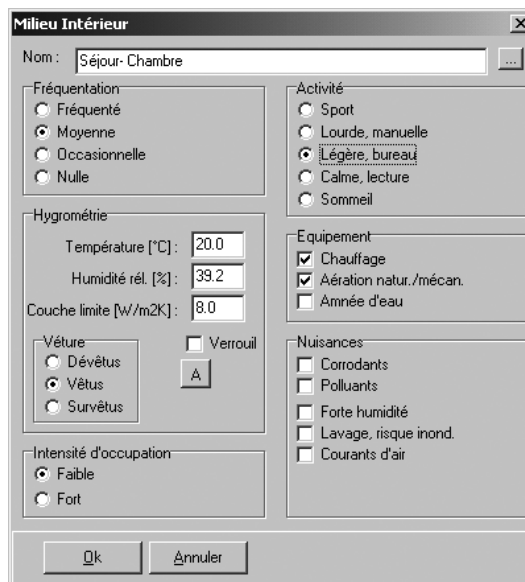


FIG. 4.6 – Interface utilisateur - *Milieu intérieur*

paramètres	Fréquentation				Environnement					Nuisances				Description
Milieu	Trafic, foule	Passante, piétons	Occasionnelle	Nulle	Artère, industrie	Carrefour, commerces	Rue, magasins	Tranquille, habitat	Calme, isolé	Corrodants	Polluants	Enterré	Immergé	
Artère	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Rue très fréquentée
Cour d'immeuble	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Cour intérieure d'un immeuble d'habitation ou administratif
Rue	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Rue avec trafic normale, ev. commerces
Zénith	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Milieu inaccessible en contact direct avec le ciel pour éléments horizontaux ou inclinés
Sol	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Milieu enterré pour simuler des parois de sous-sols

TAB. 4.4 – Exemples de configuration de quelques milieux extérieurs

Milieu intérieur

L'*objet-milieu intérieur* représente tous les environnements se situant à l'intérieur de l'enveloppe d'un bâtiment. Pour décrire ce type de milieu quelques paramètres ont été ajoutés aux paramètres communs.

L'*intensité d'occupation* indique le nombre de personnes pouvant se trouver simultanément dans un milieu intérieur. Ainsi, par exemple, une salle de conférence peut avoir une forte intensité d'occupation et une fréquentation occasionnelle, alors qu'un bureau aura une faible intensité d'occupation et une fréquentation élevée.

Le paramètre *Activité*, décrit la nature de l'activité humaine pratiquée dans le lieu. Il a une influence sur

les sollicitations mécaniques et peut prendre une des valeurs indiquées dans le tableau 4.5.

Catégorie	Description	Lieux typiques
Sport	Activité sportive, personnes en déplacement	Salles de sport, salles de bain, couloirs, ascenseurs, dépôts
Lourde, manuelle	Activité physique lourde	Ateliers, chantiers, usines, cuisines
Légère, bureau	Activité physique légère	Bureaux, réfectoire, restaurants
Calme, lecture	Activité physique minimale	Séjours, chambres d'enfants,
Sommeil	Sans activité	chambres à coucher, lieux inaccessibles

TAB. 4.5 – Définition des différentes catégories d'Activité

Le paramètre *Vêtue* décrit combien les utilisateurs sont habillés. Il permet d'adapter la température en fonction des nécessités de confort thermique. Les différents types d'application sont montrés dans le tableau 4.6.

Catégorie	Description	Lieux typiques
Survêtus	Habillement pour l'extérieur	Lieux publics non chauffés, zones de circulation, caves, greniers
Vêtus	Habillement pour l'intérieur	Bureau, habitations, écoles, magasins, salles de sport
Dévêtus	Sans habits	Piscines, salles de bains

TAB. 4.6 – Description des catégories de *Vêtue*

Comme pour les environnements extérieurs, les conditions particulières peuvent être activées par le choix d'options de *Nuisances* présentées au tableau 4.7.

Option	Description	Locaux typiques	Contrainte influencée
Amenée d'eau	Locaux avec un équipement sanitaire (lavabo, évier, WC, douche, bain etc.)	Locaux sanitaires, bains, cuisines	Mouillage
Humidité	Locaux avec un taux d'humidité élevé provoqué par l'évaporation d'eau chaude ou par une forte occupation (évapo-transpiration)	Caves, douches, cuisines	Mouillage
Lavage	Locaux destinés aux soins corporels ou pour d'autres types de lavage	Bains, douches	Mouillage
Chauffage	Locaux chauffés	Habitations, bureau, ateliers, magasins, écoles etc.	Température et humidité relative
Aération	Tout local étant ventilé	Tous les milieux sauf quelques exceptions comme des dépôts etc.	Polluants et Courants d'air
Courant d'air	Locaux dont l'enveloppe n'est pas étanche à l'air ou dont les fenêtres ou portes sont fréquemment ouvertes	Combles, ateliers, lieux de passage	
Polluants	Fort taux de polluants	Caves, locaux techniques, ateliers	Pollution

TAB. 4.7 – Définition des options de *Nuisances* pour les milieux intérieurs

Le tableau 4.8 à la page suivante illustre la configuration de quelques milieux intérieurs.

paramètres	Occupation				Intens. d'occ.		Activité					Vêtue			Nuisances							
	Fréquentée	Moyenne	Occasionnelle	Nulle	Forte	Faible	Sport	Lourde, manuelle	Légère, bureau	Calme, lecture	Sommeil	Survêtus	Vêtus	Dévêtus	Amenée d'eau	Humidité	Lavage	Chauffage	Aération	Courants d'air	Corrodants	Polluants
Milieu																						
Ascenseur			o		o		o					o							x			
Atelier	o				o			o				o						x	x	x	x	x
Bureau	o					o			o			o						x	x			
Cave			o			o	o					o				x			x			
Chambre à coucher	o					o					o	o						x	x			
Chaufferie			o			o		o				o			x				x			x
Citerne				o		o					o			o					x			x
Combles			o			o	o					o							x	x		
Couloir			o		o		o					o						x	x			
Cuisine	o					o		o				o			x	x	x	x	x			x
Dépôt			o			o	o					o										
Escalier			o			o	o					o							x			
Piscine fermée	o					o	o						o	x	x	x	x	x	x		x	
Réfectoire		o			o				o			o						x	x			
Salle d'eau		o				o	o						o	x	x	x	x	x	x			
Salle de sport	o				o		o					o				x		x	x			
Salle publique		o			o					o		o				x		x	x			
Sanitaire			o			o				o		o			x		x	x	x			x
Séjour		o				o				o		o						x	x			

TAB. 4.8 – Exemples de configuration de quelques milieux intérieurs

4.2 Simulation

Pour simuler le comportement de l'élément de construction au cours des années de sa vie, le modèle recalcule les contraintes et les performances des couches dans une boucle itérative.

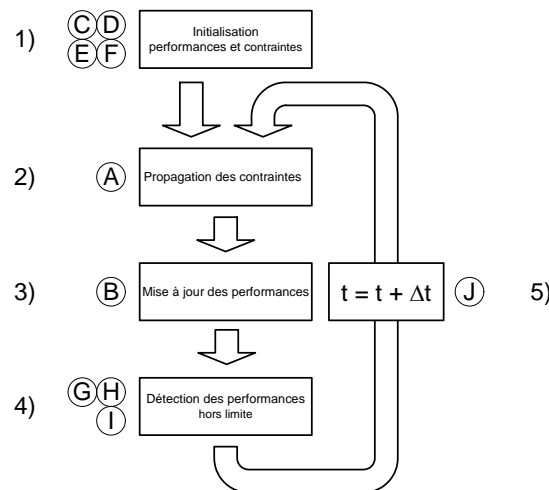


FIG. 4.7 – La boucle itérative

La simulation se déroule de la façon suivante :

- 1) Les valeurs des contraintes © et performances © sont initialisées. Les rôles sont établis © et les valeurs de seuil sont définies © pour les performances globales de la paroi ou pour des performances individuelles des matériaux.
- 2) La *propagation des contraintes* © est calculée selon les règles décrites au chapitre 4.2.2
- 3) La *variation des performances* © est calculée (voir paragraphe 4.2.3)
- 4) Les performances globales sont calculées ©.
Les nouvelles valeurs de performances sont comparées avec des valeurs de seuils ©. En cas de franchissement du seuil, une alarme est enregistrée.
Les paramètres de simulation (performance et contraintes) sont enregistrés © pour l'analyse ultérieure.
- 5) Les points 2), 3) et 4) sont répétés en fonction de la durée de simulation. A chaque cycle, le temps est incrémenté ©.

4.2.1 Initialisation (1)

Avant de débiter la simulation proprement dite, les différents paramètres des divers objets doivent être initialisés. Il s'agit des contraintes C_{A0} et C_{B0} sollicitant les faces A et B, des diverses performances des matériaux à l'état neuf ainsi que de la détermination des rôles avec la définition des seuils correspondants. En plus certains compteurs et variables comme la durée t doivent être mis à zéro. Finalement on doit également préparer l'enregistreur pour recevoir les différentes données à mémoriser.

Initialisation des contraintes agissant sur les faces ©

La détermination des contraintes agissant sur les deux faces de la paroi se fait en tenant compte des caractéristiques de l'objet-milieu correspondant ainsi que de quelques attributs de la paroi tels qu'orientation, inclinaison, étage etc. Ceci correspond à la partie © de la méthode, décrite au chapitre 3.7.3 - Relation Milieu-Contraintes.

Les règles pour initialiser les différentes contraintes sont décrites dans le chapitre 5, à la fin de la description de chaque contrainte.

Les règles d'initialisation de la contrainte *Mouillage* dans un milieu extérieur sont représentées dans la figure 4.8 à titre d'exemple.

Procedure Init_Mouillage_ext										
IF Immergé										
THEN	ELSE									
M:=10	IF Enterré									
	THEN	ELSE								
	M:=6	IF Protège_contre_l'eau								
		THEN	ELSE							
	M:=0	M:=4								
		IF Pente>=90°								
		THEN							ELSE	
		CASE Étage OF								
		moyen				haut				
		M:=M · 1.1				M:=M · 1.2				
		IF Protégé contre le vent								
		THEN							ELSE	
		M:=M · 0.8								
		IF Protégé contre la pluie								
		THEN							ELSE	
		M:=M · 0.5								
		IF Inclinaison>=45°								
		THEN							ELSE	
		CASE Orientation OF						M:=M · 1.5		
		W					ELSE			
		M:=M · 2				M:=M · 1.5				
		CASE Inclinaison OF								
		0°		15°		30°		45°		90°
		IF côté=dessous		M:=M · 1.8		M:=M · 1.6		M:=M · 1.4		M:=M · 0.8
		THEN	ELSE							
		M:=0.5		M:=M · 2.5						
Mouillage:=M										

FIG. 4.8 – Exemple de procédure pour initialiser une contrainte - Contrainte Mouillage avec Milieu extérieur

Initialisation des performances ⑤

L'initialisation des performances des objets-couches consiste à attribuer des valeurs à l'état neuf. Elle se fait d'après des règles qui sont propres aux objets et en tenant compte de certains attributs tels que l'épaisseur, la qualité ou le type de joint.

Comme nous le verrons encore plus loin⁶, les valeurs initialisées peuvent être des valeurs discrètes ou des valeurs aléatoires définies à l'aide d'un dé électronique et une fonction de distribution.

Les divers niveaux de performance sont définis dans le chapitre 6 alors que les valeurs ainsi que les règles pour les déterminer sont décrites pour quelques classes-matériau dans l'annexe A.

La figure 4.9 montre, à titre d'exemple, les règles utilisées pour initialiser les performances de la classe *Carreau céramique*

Définition des rôles et des critères de performance ⑤+⑥

Dans un premier temps, les rôles sont définis de manière automatique d'après le type d'élément (voir chapitre 3.9, Tableau 3.12)

Une deuxième étape consiste à définir pour chaque rôle, les performances nécessaires à son accomplissement, puis d'assigner une valeur de seuil pour chaque performance. Celle-ci, pour définir la limite en dessous de laquelle le rôle en question ne peut plus être assumé et qu'un message d'alerte doit être enregistré.

⁶Voir paragraphe 4.4 - Calcul stochastique

Procédure CarreauCeramique.InitPerformance	
Absorption de chocs:=10	
Résistance à l'usure:=6	
Résistance aux chocs:=5	
Résistance au poinçonnement:=10	
Résistance au délavage:=10	
Résistance à la corrosion:=10	
CASE Joints OF	
Ouverts	Scellés
Etanchéité à l'eau:=1	Etanchéité à l'eau:=9
Etanchéité à l'air:=4	Etanchéité à l'air:=10
Etanchéité à la lumière:=8	Etanchéité à la lumière:=10
CASE Qualité OF	
Grès	Faïence
Aspect:=10	Aspect:=8
Poli:=10	

FIG. 4.9 – Initialisation des performances de la classe "Carreaux Céramiques"

Rôles	Perf	Seuils	Niv. d'alerte
Être étanche à l'air	Etanchéité à l'air	Max(VitesseAir_ A,VitesseAir_ B)	2
Être étanche à l'eau	Etanchéité à l'eau	Max(Mouillage_ A,Mouillage_ B)	4
Isoler thermiquement	Valeur U	66% Rth orig.	2
Être transparent	Etanchéité à la lumière	80% Transparence orig	1
Avoir une résistance statique	Résistance statique	50% Rés. statique orig.	3
		10% Rés. statique orig.	5
Être résistant à l'usure	Résistance à l'usure	Max(UsureMeca_ A,Delavage_ A/10)	2
Face A :Être résistant aux chocs	Résistance au chocs	Chocs_ A	2
Face B :Être résistant aux chocs	Résistance au chocs	Chocs_ B	2
Face A :Avoir un aspect de surface	Aspect matériaux A	66% Aspect orig.	1
Face B :Avoir un aspect de surface	Aspect matériaux B	66% Aspect orig.	1

TAB. 4.9 – Exemples de règles pour la définition des seuils de défaillance

Le tableau 4.9 indique les règles pour calculer les seuils des différents rôles. Une partie des rôles définissent leur seuil à partir des contraintes externes. Ainsi l'élément doit être plus *étanche à l'air* que les contraintes *Courants d'air*, plus *étanche à l'eau* que les contraintes *Mouillage*, plus *résistant à l'usure* que les contraintes *Usure mécanique* et plus *résistant aux chocs* que les contraintes *Chocs*. Les seuils des autres rôles sont définis par une diminution maximale de la performance initiale. Ainsi l'*Isolation thermique* et l'*Aspect* doivent être supérieurs à 66% de leur valeur initiale. Pour la *Résistance statique*, ce seuil a été défini à 50%.

Catégorie d'alerte	Signification
1	Défaillance esthétique, sans conséquence pour le fonctionnement "techniques"
2	Défaillance d'une performance
3	Défaillance avancée
4	Début d'un processus entraînant la ruine
5	Ruine de l'élément

TAB. 4.10 – Signification des catégories d'alerte

A chaque rôle, est également associé un niveau d'alerte pour indiquer la gravité de la défaillance. Le tableau 4.10 résume la signification de ces niveaux tels qu'ils ont été définis pour ce travail. Par l'introduction de ces

niveaux, il devient possible de distinguer entre des événements mineurs (niveau 1) tels que la perte d'aspect et des événements très graves (niveau 5) tels que la ruine complète d'une couche ou du composant entier.

La dernière colonne du tableau 4.9 indique le niveau d'alerte pour les différents rôles.

4.2.2 Propagation **(A)**

Comme décrit au paragraphe 3.6.1, la *propagation* permet de déterminer la progression respectivement la répartition des contraintes à l'intérieur de la *Paroi*.

Pour modéliser les modes de propagation décrits au paragraphe 3.6.1 tout en tenant compte des spécificités de certains phénomènes, plusieurs algorithmes sont appliqués dans le modèle.

Ainsi les contraintes *Température*, *Pression Vapeur d'eau* et la *Concentration CO₂* sont calculés selon les lois physiques de la conduction de chaleur et de la diffusion des gaz. Leurs niveaux de contraintes s'équilibrent en fonction des résistivités des couches. Les trois phénomènes ont des caractéristiques linéaires et peuvent être représentés par des schémas électriques ou hydrauliques équivalent. Les analogies entre les différentes lois physiques sont résumées en annexe B.2.

Les matériaux contenant du ciment ou de la chaux hydraulique constituent un cas particulier pour la diffusion du gaz carbonique car elles "consomment" le CO₂ lors de la carbonatation. Une méthode pour simuler ce phénomène est présentée et discutée en annexe B.

Le deuxième modèle de propagation reprend la fonction "filtrante" des couches. Ainsi, les contraintes sont diminuées au passage des couches selon trois manières différentes. La figure 4.10 illustre ces méthodes.

Les contraintes *Poinçonnement*, *Chocs*, *Polluants*, *Vitesse d'air*, *Mouillage* et *Lumière* sont diminuées par les propriétés *Absorption Chocs*, *Etanchéité à l'air*, *Etanchéité à l'eau*, *Etanchéité à la lumière*. Le choix des niveaux de performances ainsi que des niveaux de contraintes a été fait pour calculer cette atténuation par une simple soustraction (voir formule 3.1). selon la relation :

$$C_{n_{i+1}} = f(C_{n_i}, P_{n,i}) \quad \left\{ \begin{array}{ll} C_{n_{i+1}} = C_{n_i} - P_{n,i} & \text{si } e_i > 0 \\ C_{n_{i+1}} = C_{n_i} & \text{si } e_i = 0 \end{array} \right. \quad (4.1)$$

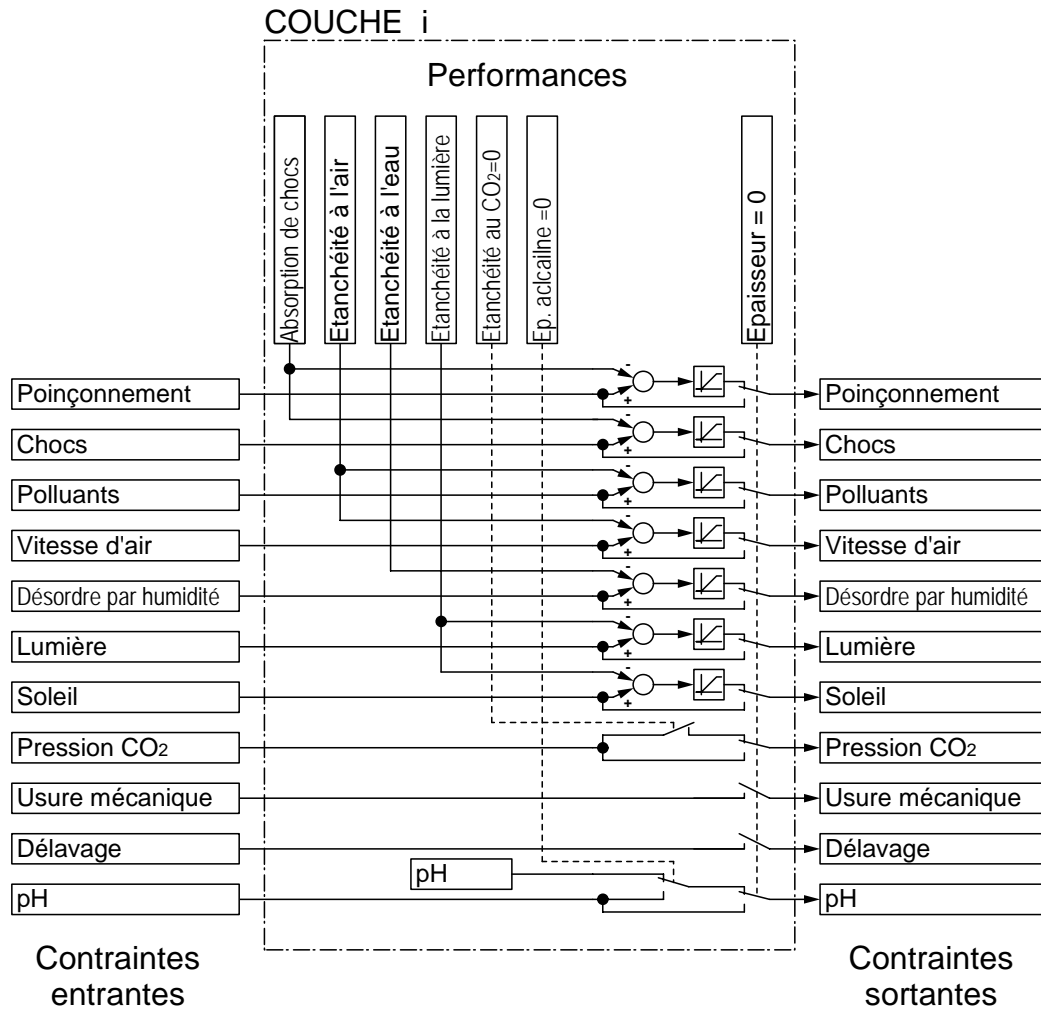
avec :

- $C_{n_{i+1}}$ Contrainte sortante
- C_{n_i} Contrainte entrante
- $P_{n,i}$ Performance responsable pour la propagation de la Contrainte C_n
- e_i Epaisseur de la couche

Selon cette règle, lorsque la couche est en ruine (*Epaisseur* = 0), les performances sont considérées étant toutes nulles et les contraintes transmises tel quel.

Les contraintes abrasives telles que l'*Usure mécanique* et le *Délavage* ne peuvent agir que sur les surfaces extérieures de la paroi. C'est pourquoi on admet que ces contraintes n'agissent que sur les couches extérieures et ne sont transmises, uniquement que lorsque cette dernière a disparu (épaisseur=0).

$$C_{Usure_{i+1}}, C_{Délavage_{i+1}} \quad \left\{ \begin{array}{lll} C_{Usure_{i+1}} = 0 & C_{Délavage_{i+1}} = 0 & \text{si } e_i > 0\% \\ C_{Usure_{i+1}} = C_{Usure_i} & C_{Délavage_{i+1}} = C_{Délavage_i} & \text{si } e_i = 0\% \end{array} \right. \quad (4.2)$$

FIG. 4.10 – Présentation schématique de la *Propagation des contraintes*

Cette dernière forme de propagation est introduite dans le but simuler des phénomènes de corrosion dans des bétons armés. Pour les matériaux à base de chaux hydraulique qui se carbonatent, on admet que la valeur-pH transmise à la couche suivante est celle de la couche même. Ceci pour autant que la couche ne soit pas complètement carbonatée (Taux de carbonatation = 100%).

$$C_{pH_{i+1}} \begin{cases} C_{pH_{i+1}} = pH_i & \text{si } TauxCarbonatation_i < 100\% \\ C_{pH_{i+1}} = C_{pH_i} & \text{si } TauxCarbonatation_i = 100\% \end{cases} \quad (4.3)$$

4.2.3 Variation de performances (B)

Selon la méthode décrite au chapitre 3.6, la dégradation d'un matériau se manifeste par la variation de performances. Ainsi, à chaque cycle d'itération de la simulation, les différents performances sont recalculées. Comme présenté à l'équation 3.4, la nouvelle performance ($P_{m,t+1}$) est déterminée par sa valeur actuelle ($P_{m,t}$), le niveau des contraintes (C), ainsi que la durée d'un pas d'itération (Δt).

$$P_{m,t+1} = f(P_{m,t}, C_1, C_2, \dots, C_n, \dots, C_N, \Delta t) \quad (4.4)$$

Dans la modélisation actuelle, le choix des échelles de contraintes et de performances permet de calculer la variation des performances, c.à d. ce passage de $P_{m,t}$ à $P_{m,t+1}$, par une simple soustraction. A chaque cycle, la performance actuelle ($P_{m,t}$) est diminuée d'une valeur $\Delta P_{m,t}$ qui sera calculée d'après les contraintes

$(C_1..C_N)$ et la durée de l'intervalle (Δt)

$$P_{m,t+1} = P_{m,t} - \Delta P_{m,t} \quad (4.5)$$

$$P_{m,t+1} = P_{m,t} - \Delta P_{m,t}(C_1, \dots, C_n, \dots, C_N, \Delta t) \quad (4.6)$$

avec

$P_{m,t+1}$: La Performance m au temps $t + 1$
 $P_{m,t}$: La Performance m au temps t
 $\Delta P_{m,t}$: La variation totale de la Performance m au temps t .

La variation totale de la Performance m étant à déterminer à partir des intensités des différents Contraintes $(C_1..C_N)$ tout en étant proportionnel à la durée de l'intervalle de calcul Δt : $\Delta P_{m,t} = f(C_1, \dots, C_n, \dots, C_N) \cdot \Delta t$.

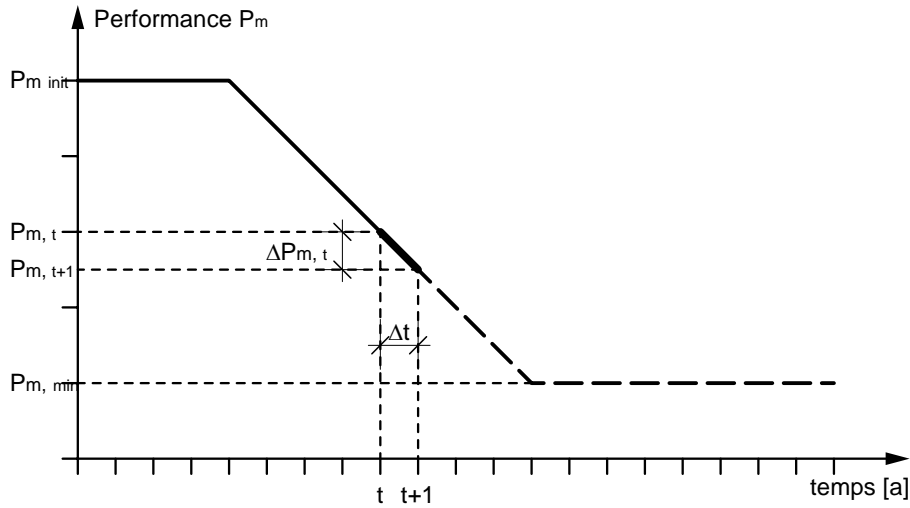


FIG. 4.11 – Illustration de la formule 4.5

A chaque intervalle de calcul, la performance P_m est diminué de la valeur $\Delta P_{m,t}$

La variation totale $\Delta P_{m,t}$ elle-même est obtenu par l'addition des influences individuelles de chaque contrainte $\Delta P_{m,n,t}$

$$\Delta P_{m,t} = \sum_n \Delta P_{m,n,t}(C_{n,t}) \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

avec

$\Delta P_{m,n,t}$: Variation de performance P_m induit par la seule contrainte C_n
 Δt : Durée de l'intervalle de l'itération en années [a]. Cette durée est en principe d'une année mais peut être adaptée facilement.

La relation dose-réponse entre une sollicitation et la dégradation résultante est un des points clé de la modélisation.

La diminution induite par chaque contrainte dépend à la fois de l'intensité de la contrainte $Contr_n$ ainsi que d'un facteur de pondération $\Delta P_{m,n,max}$ qui détermine l'influence de la contrainte $Contr_n$ sur la performance P .

Cette relation représente la relation dose-réponse entre les sollicitations et la dégradation résultante.

$$\Delta P_{m,n} = \left(\frac{C_n}{10} \right)^2 \cdot \Delta P_{m,n,max} \quad (4.8)$$

avec :

C_n : Niveau de Contrainte n avec une échelle [0 ... 10]

$\Delta P_{m,n,max}$: Variation maximale de la Performance pour une Contrainte n maximale (=10) [unité/a]

L'intervalle de calcul

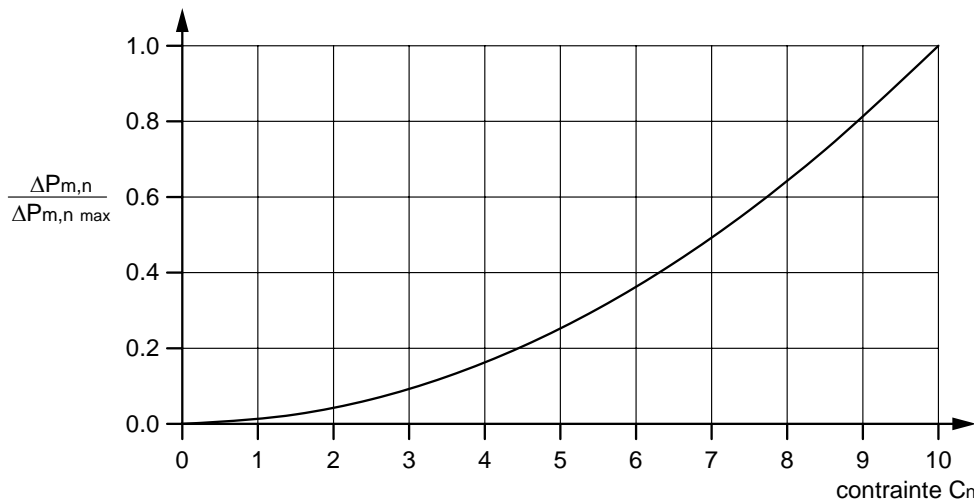


FIG. 4.12 – Illustration de la relation 4.8

Ainsi pour pouvoir simuler la détérioration d'un matériau en fonction des contraintes, les différentes *Variations maximales* $\Delta Perf_{m,n,max}$ doivent être établies. Ceci pour chaque combinaison Performance-Contrainte. La figure 4.13 montre ces valeurs représentées sous forme d'une grille. Les valeurs $\Delta Perf_{m,n,max}$ y sont exprimées pour une durée d'itération d'une année. On peut constater que la plupart des performances sont insensibles aux contraintes ayant par conséquent une Variation $\Delta Perf_{m,n,max}$ de zéro. C'est pourquoi les cases correspondantes ne sont pas remplies.

Dans les cas de la laine minérale, la performance *Epaisseur* est sensible aux contraintes *Usure mécanique*, *Délavage* ainsi qu'aux *Courants d'air* qui peuvent provoquer une perte de matière par défibrage. L'*Aspect* est affecté par des sollicitations mécaniques (*Usure mécanique*, *Chocs*, *Poinçonnement*) mais aussi par la *Pollution* et la contrainte *Lumière* pouvant provoquer la dépolymérisation de la résine servant de liant aux fibres de verre. La conductibilité thermique λ_{th} augmente également lorsque de l'eau s'introduit dans le matériau.

4.2.4 Détection des défaillances (E) (F)

Après chaque cycle de calcul, les performances globales sont recalculées à partir des performances des couches. La détection de défaillance se fait en comparant ces performances avec la valeur de seuil définie au préalable (voir Initialisation).

Lorsqu'une performance dépasse son seuil de défaillance, un message d'alerte est envoyé à l'enregistreur d'événement. Ce message comporte en plus de la nature de l'événement la date de l'événement ainsi qu'une indication de la gravité de l'alerte à travers les catégories d'alerte.

	Unité	Valeur Initiale	Usure mécanique	Délavage	Poinçonnement	Chocs	Polluants	Mouillage	Courants d'air	Lumière	Soleil
Epaisseur	mm	Ep.	10	1					25		
Résistance à l'usure	-10...10	-3.3									
Résistance au délavage	-10...10	-3.3									
Absorption de chocs	0...10	1									
Résistance statique	0...10	1									
Résistance aux chocs	0...10	10									
Résistance au poinçonnement	0...10	1									
Résistance à la corrosion	0...10	10									
Etanchéité à l'eau	0...10	1									
Etanchéité à l'air	0...10	1									
Etanchéité au CO ₂	0...10	0									
Etanchéité à la lumière	0...10	10									
Aspect	0...10	1	2		1	1	1			1	
Poli	0...10	1	2		1						
Résistivité thermique	W/mK	0.04						-0.56			
Résistivité à la diff. de vap.	mg/m h Pa	0.64									

FIG. 4.13 – Grille des valeurs $\Delta P_{n,max}$ pour le matériau *Matelas de Laine de verre léger*.

Les valeurs $\Delta P_{m,n,max}$ sont exprimées en [unités/an].

Dans les cellules non remplies, la valeur $\Delta P_{m,n,max}$ est nulle.

4.2.5 Système de niveaux

Pour pouvoir intégrer les contraintes et les performances dans le modèle, il était nécessaire de pouvoir leur attribuer une valeur chiffrée pouvant être utilisée dans les différents calculs. Certaines types de contraintes, comme p.ex. la température, la pression de vapeur d'eau ou le taux de CO₂ ont pu être exprimées dans des échelles conventionnelles qui trouvent également leur équivalent dans les performances comme la conductivité thermique ou les coefficients de diffusion des vapeurs et de CO₂. Pour d'autres grandeurs, une échelle ad hoc été définie sous forme de niveaux. Ceci soit parce qu'aucune grandeur physique ne peut les décrire, soit pour tenir compte des grandes différences entre les faibles et les fortes intensités par une échelle à caractère logarithmique. Ces niveaux permettent d'exprimer l'intensité de la contrainte ou la valeur d'une performance dans une plage comprise entre 0 et 10. Le *niveau 0* signifie une intensité de contrainte nulle ou aucune performance. Le *niveau 10* équivaut à l'intensité de contrainte ou la performance maximale. Pour être compatible avec la durée d'intervalle de temps Δt d'une année, les niveaux contraintes représentent l'intensité cumulée de la sollicitation sur une année.

La mise au point de ces échelles de niveau, qui parfois peuvent paraître arbitraires, c'est fait dans le cadre d'une réflexion profonde et globale qui a accompagné le développement de la méthode. Ainsi, elles devaient couvrir un ensemble de sollicitations de même type mais d'intensité fort différente ou des valeurs de performance pouvant varier fortement entre un matériau et l'autre comme p.ex. la résistance statique d'une dalle en béton et celle d'une couche de peinture. Les échelles de niveaux des contraintes devaient également être adaptées aux échelles des niveaux de performances. Ceci parce que, par les calculs de la *propagation des contraintes* et de la *variation des performances*, les niveaux de contraintes sont fortement liés aux niveaux de performances.

Concernant la définition de ces échelles, on doit aussi admettre que le choix d'exprimer les différentes grandeurs dans un intervalle allant de 0 à 10 est arbitraire. A la place, on aurait très bien pu utiliser un intervalle allant de 0 à 1, de 0% à 100% ou un autre. De ce choix découlent toutefois la détermination de tous les autres paramètres utilisés dans le calcul. Ainsi toutes les données concernant les contraintes et les performances présentées dans les chapitres suivants sont adaptées à ce système de niveaux et forment un

tout cohérent. Néanmoins, il serait théoriquement possible de prendre un autre intervalle et d'adapter les divers paramètres proportionnellement.

La détermination des diverses échelles de niveaux est présentée dans les chapitres 5 CONTRAINTES et 6 PERFORMANCES.

4.3 Choix de la durée de l'intervalle Δt

Dans les simulations dynamiques, qui étudient l'évolution d'un phénomène dans le temps par le passage d'un état E_i au temps t à un état E_{i+1} au temps $t + \Delta t$, le choix de la durée de l'intervalle Δt a toute son importance.

$$E(t) \rightarrow E(t + \Delta t) \quad (4.9)$$

Dans ces calculs, l'évolution de l'état n'est pas connue en tout temps mais uniquement à des moments précis c.-à.-d. au temps t_0, t_1, \dots, t_n . La figure 4.14 illustre la différence entre un régime continu et un régime discret. Dans les intervalles, entre deux moments connus, l'état est, la plupart du temps, supposé constant, ce qui conduit inévitablement à certaines imprécisions et erreurs dans le calcul. Ces erreurs peuvent être réduites par une augmentation du nombre d'étapes calculées, ce qui revient à diminuer l'intervalle de calcul Δt . L'augmentation du nombre d'étapes calculées augmente malheureusement également le temps de calcul de la simulation, c'est pourquoi il s'agit là de trouver un bon compromis entre efficacité de calcul et marge d'erreur.

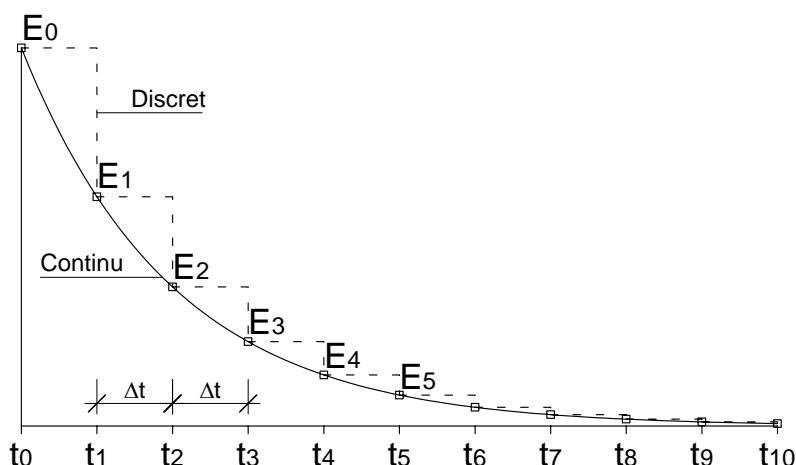


FIG. 4.14 – Cont-Discret

Lors du développement du logiciel AMB, cet intervalle a été choisi d'une durée d'une année ($\Delta t = 1 \text{ an}$). Différentes raisons justifient ce choix apparemment arbitraire :

- Le cycle des saisons et des contraintes en découlant est un cycle annuel. Une diminution de l'intervalle Δt à 6 mois, 3 mois ou moins nécessiterait de prendre en compte des phénomènes saisonniers et de ne traiter p.ex. les dégradations de gel-dégel qu'en hiver ou des problèmes de surchauffe qu'en été.
- La plupart des phénomènes sont relativement lents et la dégradation s'effectue sur plusieurs années. Ainsi une mise à jour année après année permet de suivre cette évolution avec suffisamment de précision.
- La marge d'erreur des résultats calculés dépend avant tout de l'incertitude des paramètres et de la simplicité des algorithmes. Elle est dans tous les cas supérieure à 1 an, voire plutôt entre 3 et 10 ans.

Toutefois, pour vérifier l'influence de l'intervalle de temps Δt sur les résultats de calcul, l'outil a été adapté pour permettre la variation de Δt et quelques simulations comparatives ont été effectuées sur le modèle de

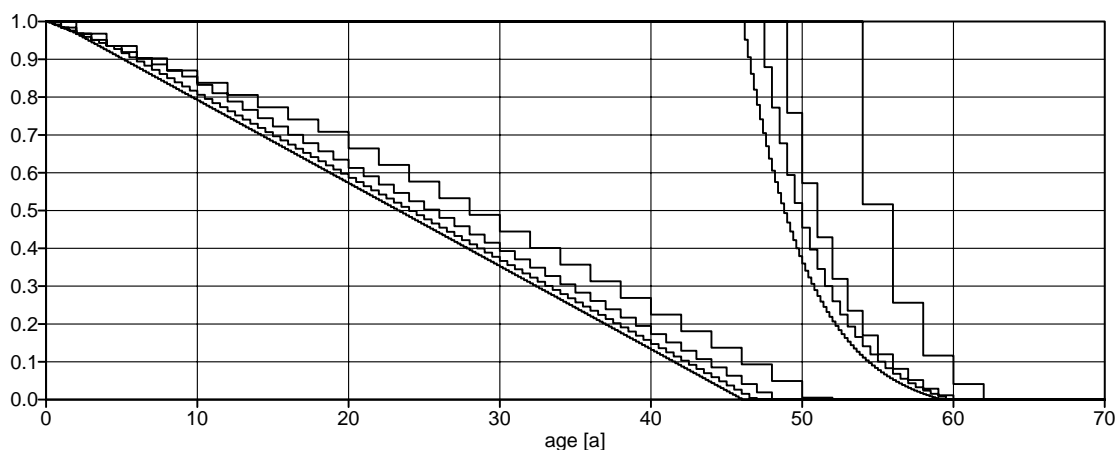


FIG. 4.15 – Comparaison de deux courbes de performances pour différentes durée d'intervalle
Durée d'intervalle $\Delta t = 0.2, 0.5, 1$ et 2 ans
(voir étude de cas figure 7.5)

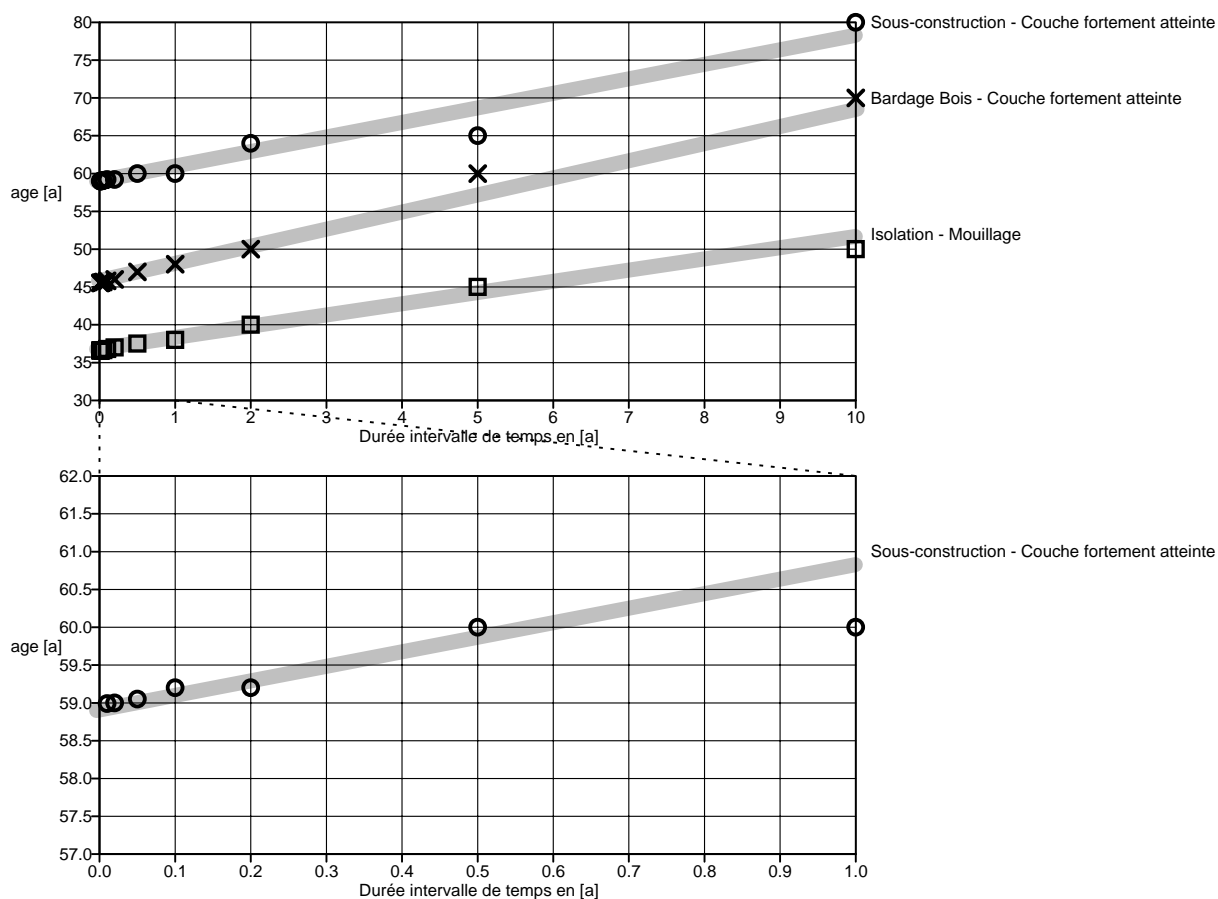


FIG. 4.16 – Influence de la durée de l'intervalle de simulation Δt sur le résultat

la façade ventilée présentée au chapitre 7 - *Etude de cas*.

Les figures suivantes illustrent les variations de l'évolution des performances (figure 4.15) ainsi que de l'âge de défaillance (figure 4.16) en fonction de l'intervalle de temps Δt . Ceci pour le bardage, la sous-

construction ainsi que la couche d'isolation ⁷. La figure 7.5 représente l'allure des courbes de performances du *bardage* et de la *sous-construction* avec des Δt de 0.2, 0.5, 1, et 2 ans. Pour les deux couches on peut voir que la courbe est déplacée vers la droite au fur et à mesure que l'on diminue le nombre de points calculés. Le même constat peut être fait avec la figure 4.16. Ici, les défaillances du *bardage*, de la *sous-construction* ainsi que de l'*isolation* ont été calculées sur le même modèle avec divers intervalles de temps ($\Delta t=0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5$ et 10 ans). L'augmentation de l'intervalle Δt conduit à une augmentation de l'âge de défaillance calculé c.-à-d. à une estimation plus optimiste.

La raison pour ces différences induites par la variation de Δt est à chercher dans la nature d'interdépendance entre les contraintes et les performances de notre modélisation. Ceci car à chaque cycle de calcul, la diminution de performances selon la relation 3.4⁸ augmente en même temps que l'intensité des contraintes transmises. Dans une simulation avec un petit intervalle Δt , l'intensité des contraintes internes croît, par ce phénomène, plus rapidement, ce qui accélère à son tour la dégradation des performances. Nous observons alors une diminution de l'âge de défaillance lorsque nous diminuons Δt . Il s'agit là d'une erreur systémique qui est inhérente à la modélisation.

Les essais illustrés dans la figure 4.16 montrent aussi que la relation entre l'intervalle Δt et l'âge de défaillance est approximativement linéaire. L'erreur est environ 1 à 2 fois la durée de l'intervalle. Ainsi, à partir d'une certaine limite, une diminution de Δt n'influence que très peu les résultats tout en augmentant considérablement les temps de calcul.

On peut également constater, que pour des intervalles Δt en dessous d'une année, la variation du résultat est également inférieure à une année, maximum 2 ans.

Ceci nous permet d'affirmer que, jusqu'à une valeur d'un an, les erreurs de calculs dues à l'intervalle de temps Δt sont inférieures aux variations induites par l'incertitude des paramètres et algorithmes. Maintenir l'intervalle Δt à une année constitue donc un optimum permettant de minimiser les temps de calculs sans augmenter l'erreur inhérente à cette modélisation.

4.4 Calcul stochastique

La corrélation entre les résultats issus d'une modélisation et les données réelles des phénomènes simulés dépend d'une part de la qualité et la précision des modèles appliqués, d'autre part, elle est tributaire de la fiabilité des paramètres de calcul utilisés dans les modèles.

Dans ce sens, la qualité d'une simulation peut potentiellement être améliorée par un affinement du modèle, ce qui se traduit généralement par une prise en compte de plus de phénomènes et d'une augmentation sensible du nombre de paramètres de calcul. Une autre façon de donner plus de réalisme aux résultats de simulation consiste à évaluer la marge d'erreur des calculs. Ceci permet d'annoncer un résultat tout en précisant le taux de fiabilité de ce dernier.

Sans intervenir sur les algorithmes du modèle même, la fiabilité des résultats dépend essentiellement de la fiabilité du paramétrage. Pour les méthodes de la prédiction de la durée de vie on peut distinguer trois facteurs principaux étant à la source de l'incertitude des paramètres :

Incertitude des contraintes

Le premier aspect est lié au caractère des contraintes. Que ce soient les paramètres du micro-climat ou des sollicitations dues à l'occupation, ces valeurs ne peuvent être prédites avec exactitude et certitude à l'avance. Ceci car elles dépendent des conditions météorologiques ou de l'activité humaine. Elles ont de ce fait forcément un caractère aléatoire.

⁷Voir chapitre 7 - Etude de cas.

⁸voir chapitre 3.6.2 page 54.

Incertitude de la qualité des produits et de la mise en oeuvre

Le deuxième point d'incertitude concerne la fiabilité des caractéristiques des matériaux mis en oeuvre. Bien que les matériaux soient, la plupart du temps, produits industriellement et que leur qualité est contrôlée pendant le processus de fabrication et est garantie par le fabricant, leur préparation et leur mise en place sur le chantier peut se faire dans des conditions fort différentes. Dans ce cas, les performances des matériaux et de l'ensemble de l'élément peuvent être passablement influencées par des facteurs de mise en oeuvre. P.ex. l'adhérence des couches collées dépend de l'état de la couche support, de la façon dont la colle a été préparée ou de la température ambiante lors de l'application. C'est pourquoi les performances connues des matériaux ont également une composante aléatoire.

Incertitude et manque de données

Le troisième aspect concerne le manque de connaissance et d'expérience du comportement de certains matériaux face à diverses sollicitations. Pour permettre une simulation malgré cette absence d'information, il est possible de procéder à une estimation des paramètres manquants. Ceci peut également se faire en tenant compte d'un taux de confiance en ces estimations.

Les deux premiers aspects, c.-à-d. le caractère aléatoire des contraintes et l'incertitude des caractéristiques, sont inhérents à la nature de ce type de prévision. La troisième incertitude par contre est due à la complexité mais aussi à un manque de connaissance dans le domaine des matériaux. Elle pourrait être réduite par des efforts de recherche dans ce domaine. Les trois aspects ont comme conséquence que les résultats ont également un caractère aléatoire et devrait être accompagné d'un degré de fiabilité sous forme de :

Il y a une chance X que la défaillance Y apparaisse au plus tôt après Z ans de service.

ou

Il y a une chance X que la durée de vie soit plus petite ou égale à Z ans.

ou

Il y a une chance X qu'à l'âge Z , le composant ait atteint sa fin de vie.

Cet aspect a été ajouté à la simulation par recours à l'algorithme dit *Monte Carlo*. Cet algorithme a été choisi pour son application simple et parce qu'il permet de définir librement les caractéristiques aléatoires de chaque paramètre. L'augmentation considérable du temps de calcul par rapport à une simulation discrète ne pose pas de problème grâce à la puissance de calcul des ordinateurs actuels.

4.4.1 Variables aléatoires

Dans un premier temps, le modèle a été modifié pour permettre la description des paramètres de modélisation non pas comme des valeurs discrètes, mais comme des variables aléatoires avec des fonctions de densité de probabilité exprimant la probabilité que le paramètre P_i ait la valeur x (voir figure 4.17). Cela permet de tenir compte des facteurs d'incertitude décrits ci-dessus par la définition d'un degré de fiabilité ou de dispersion. Lors de l'initialisation avant la simulation, les valeurs discrètes des différents paramètres sont déterminées à l'aide d'un générateur aléatoire.

Les fonctions de probabilité sont généralement définies par le type de distribution (Rectangulaire, Normale, Weibull, Gumbel etc.) ainsi que deux paramètres ou plus qui définissent l'allure de la courbe. Elles peuvent être représentées sous la forme de *densité de probabilité* $p(x)$ (voir fig 4.17 haut) ou par la *fonction de répartition* $P(X)$ (voir fig 4.17 bas). La deuxième étant obtenue par l'intégration de la première selon la loi suivante :

$$P(X) = \int_{-\infty}^X p(x) dx \quad (4.10)$$

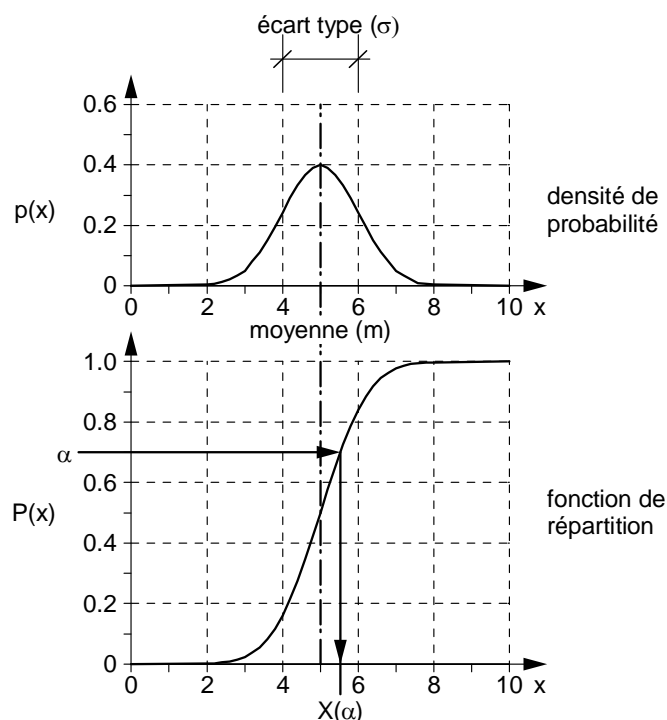


FIG. 4.17 – Distribution d'une variable aléatoire, Fonction de répartition

4.4.2 Simulation Monte Carlo

Le principe de *Simulation Monte Carlo* consiste à effectuer le même calcul (essai) à plusieurs reprises en variant, pour chaque essai, la valeur des paramètres. La détermination des valeurs se fait de manière aléatoire en respectant une distribution spécifique. Les résultats de chaque *essai* sont comptabilisés pour ensuite être présentés sous forme graphique ou numérique.

La figure 4.18 illustre le principe de la simulation Monte Carlo adaptée au modèle de prévision. Concrètement, pour chaque paramètre, un dé électronique est "lancé" pour obtenir un *nombre aléatoire* se situant entre 0 et 1 (fig 4.18 étape A). À l'aide de ce nombre ainsi que de la fonction de répartition de la *variable aléatoire*, on détermine le *paramètre aléatoire* (étape B). Après l'assignation de tous les paramètres, un *essai* de simulation est effectué (étape C). Le ou les résultats sont alors enregistrés (étape D).

Ces étapes (A à D) sont répétées un grand nombre de fois pour obtenir les résultats de plus de variantes de paramètres possibles.

Les figures 4.19 et 4.20 montrent l'enregistrement d'un évènement de défaillance issu de 10'000 simulations Monte Carlo. La figure 4.19 représente le nombre d'essais N conduisant à l'année de défaillance t . La figure 4.20 illustre les mêmes résultats sous forme de fonction de répartition. Elle permet de déterminer la probabilité que l'évènement de défaillance calculé se produise avant un certain âge. Dans cet exemple, il y a 20% de chance que l'évènement se produise avant 27 ans, 50% de chance qu'il se produise avant 33 ans et 80% de chance qu'il le soit avant 44 ans.

Cette relation entre âge et risque de défaillance (figure 4.20) peut aussi être appelée *Courbe de défaillance*. Dans certains cas, la relation complémentaire est employée pour exprimer la chance de "non-défaillance". Elle est appelée *Courbe de survie* (Überlebenskurve, König et al., 2009).

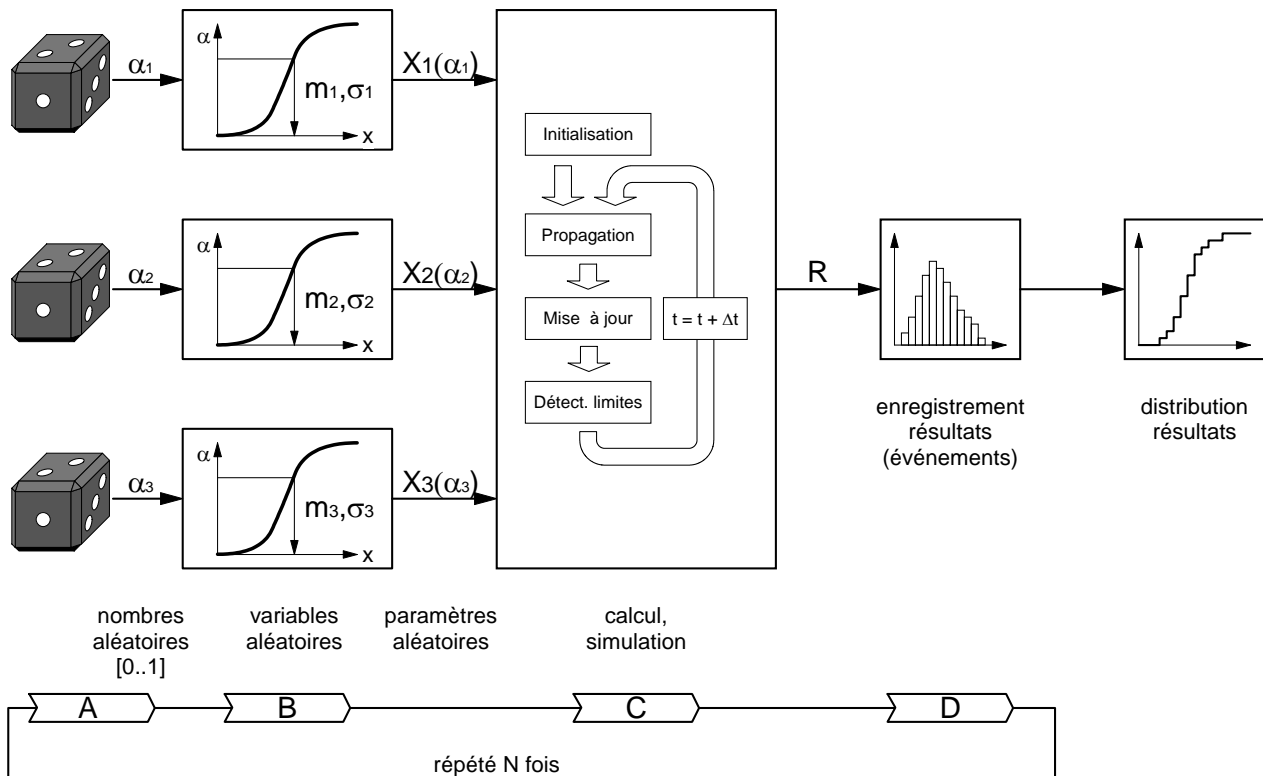
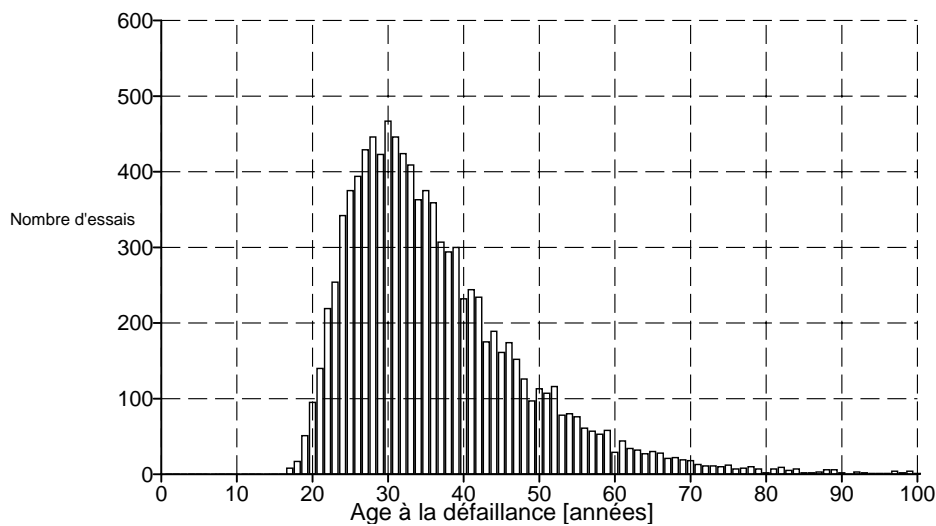


FIG. 4.18 – Principe de la méthode probabiliste

FIG. 4.19 – Résultat d'une simulation avec la méthode probabiliste (10'000 essais)
Diminution significative de l'isolation thermique d'une toiture plate

Nombre d'essais

Pour déterminer l'influence du nombre d'essai sur la distribution du résultat, la même simulation a été effectuée avec un nombre d'essai différent (100, 1'000 et 10'000 essais).

La figure 4.21 montre qu'une augmentation du nombre d'essais n'a qu'une minime influence sur les résultats. Bien que la courbe se dessine plus proprement sur le graphique de droite (10'000 essais), la médiane ainsi que la déviation standard sont très proches. Entre 1'000 et 10'000 essais, ces différences sont insignifiantes.

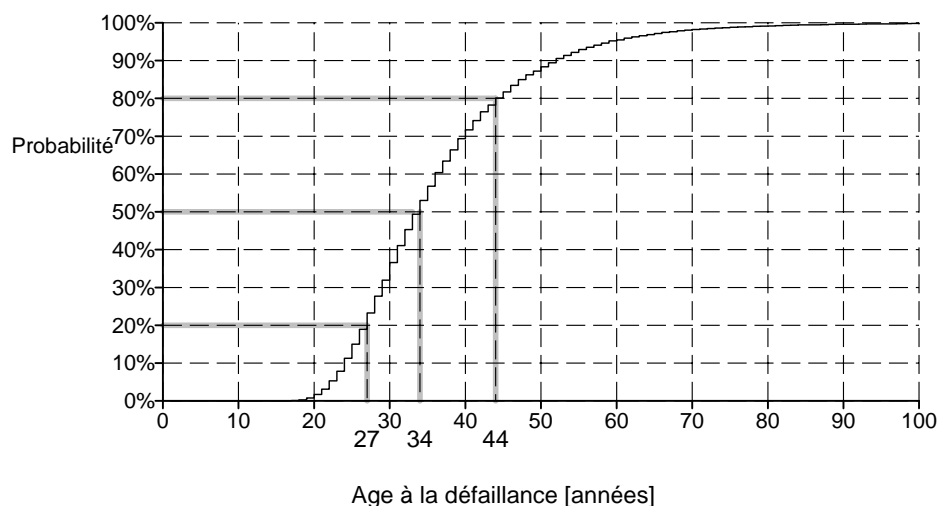


FIG. 4.20 – Fonction de répartition des résultats de figure 4.19

La table 4.11 illustre pour les mêmes essais différentes probabilités de défaillances. Avec 100 essais p.ex., le seuil de 50% est franchi à 35 ans, contre 33 ans pour 1'000 et 10'000 essais.

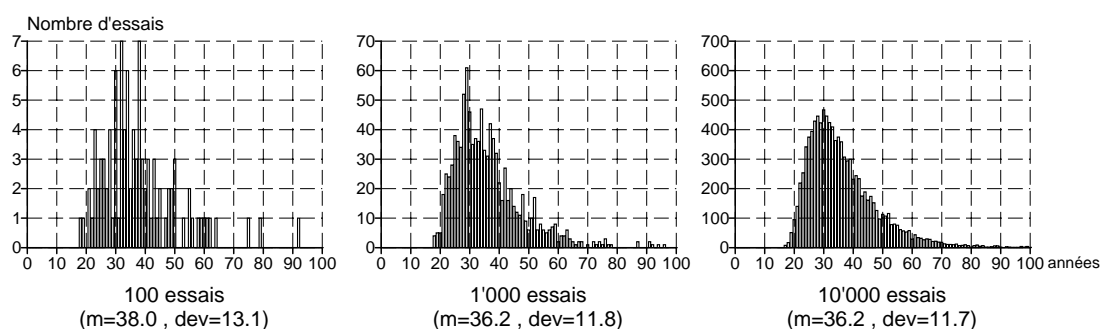


FIG. 4.21 – Distribution des résultats après 100, 1'000 et 10'000 essais

Nombre d'essais n	Moyenne μ	Dev. Std. σ	Probabilité de défaillance		
			20%	50%	80%
100	38.0	13.1	27.3	35.0	47.0
1'000	36.2	11.8	26.5	33.3	43.7
10'000	36.3	11.7	26.2	33.2	43.9

TAB. 4.11 – Influence du nombre d'essais sur la distribution des résultats

L'application de la simulation Monte Carlo sur des cas concrets est montrée au chapitre 7 - ETUDE DE CAS.

Chapitre 5

Contraintes

Les chapitre 3.7.3 que pour mesurer l'intensité effective des actions sur les ouvrages, il est nécessaire de faire la distinction entre le meso-environnement représenté par le *Milieu* et le mirco-environnement décrit par les *Contraintes*.

Intégrés dans un bâtiment, les éléments de construction sont exposés, pendant leur durée de service, à une multitude de facteurs d'influence ou d'agents différents. La norme ISO 6241 (1984) distingue entre 5 familles : les agents mécaniques, électromagnétiques, thermiques, chimiques et biologiques. Le tableau 5.2 résume les différents agents ainsi que leur origine.

Type d'agent	Agents	Contrainte	Echelle
1. Mécaniques	Grêle, efforts de manœuvre, coups de bélier	<i>Chocs</i>	0..10
	Efforts de manœuvre, chocs intérieurs et extérieurs, coups de bélier	<i>Poinçonnement</i>	0..10
	Abrasion, frottement	<i>Usure mécanique</i>	0..10
	Eau ruisselante	<i>Délavage</i>	0..10
	Vent	<i>Courants d'air</i>	0..10
2. Électromagnétiques	Soleil	<i>Lumière</i>	0..10
3. Thermiques	Réchauffement, thermo-choc	<i>Température</i>	°C
	Gel	<i>Gel</i>	0..10
4. Chimiques	Précipitations, eau de surface, eau souterraine, projection d'eau, infiltrations d'eau	<i>Mouillage</i>	0..10
	Humidité de l'air, condensation	<i>Pression vapeur</i>	Pa
	Acides, bases, milieu béton	<i>Potentiel hydrogène</i>	pH
	Gaz carbonique	CO ₂	g/m3
	Poussières, suies	<i>Polluants</i>	0..10
5. Biologique	Bactéries, moisissures, champignons	<i>Pourriture</i>	0..10

TAB. 5.1 – Sélection des contraintes

Pour la simulation des phénomènes de vieillissement, certains des agents énumérés dans la norme ISO 6241 peuvent être mis de côté car ils n'interviennent pas dans les phénomènes de dégradation. Ceci parce que :

- ils n'apparaissent que rarement (radioactivité),
- ils n'ont pas d'influence significative sur le vieillissement des matériaux (le bruit, les charges permanentes ou d'exploitation, les champs magnétiques etc.) ou
- ils sollicitent uniquement la partie structurelle de la construction (surcharges, tassements ou glissements de terrain, séismes etc.)

Dans le cadre de notre modélisation, les agents restants ont été utilisés pour définir 14 types de contraintes. Le tableau 5.1 montre les contraintes retenues avec les agents correspondants. Pour des questions de simplification, certains des agents ont été regroupés dans une même contrainte. La dernière colonne du tableau indique pour chaque contrainte le type d'échelle choisie.

Les paragraphes suivants décrivent la nature de chaque contrainte, la définition de son échelle de niveaux ainsi que la façon dont les contraintes agissant sur les faces sont calculées dans la phase initialisation des contraintes ©.

Nature	Origine		Interne au bâtiment	
	Atmosphère	Sol	Imposé par l'occupant	Conséquence de la conception
1. Agents mécaniques				
1.1 Pesanteur	Charges de neige, d'eau de pluie	Pression des terres, des eaux	Charges d'exploitation	Charges permanentes
1.2 Forces et déformations imposées	Pression de glace, dilatations thermique et hygroscopique	Tassements, glissements	Efforts de manœuvre, poinçonnement	Retraits, fluage, forces et déformations imposées
1.3 Energie cinétique	Vent, grêle, chocs extérieurs		Chocs intérieurs, frottement	Coup de bélier
1.4 Vibrations et bruits	Bruits extérieurs	Séismes, vibrations ext.	Bruits intérieurs, vibrations int.	Bruits du bâtiment, vibrations du bâtiment
2. Agents électromagnétiques				
2.1 Rayonnement	Rayonnement solaire		Lampe, rayonnement nucléaire	Paroi rayonnante
2.2 Electricité	Foudre	Courants vagabonds		Courants de distribution
2.3 Magnétisme			Champs magnétiques	Champs magnétiques
3. Agents thermiques	Réchauffement, gel, thermo-choc	Réchauffement, gel	Chaleur émise, cigarette	Chauffage, feu
4. Agents chimiques				
4.1 Eau et solvants	Humidité de l'air, condensation, précipitations	Eau de surface, eau souterraine	Projections, d'eau, condensation, détergents, alcool	Eau de distribution, eaux usées, infiltrations
4.2 Oxydants			Eau de javel, eau oxygénée	Potentiels électrochimiques positifs
4.3 Réducteurs		Sulfures	Agents combustibles, ammonium	Agents combustibles, potentiels électrochimiques négatifs
4.4 Acides	Acide carbonique, fientes d'oiseaux, acides sulfuriques	Acide carbonique, acides humides	Vinaigre, acide citrique, acide carbonique	Acide sulfurique, acide carbonique
4.5 Bases		Chaux	Soude caustique, potasse, hydrates d'ammoniac	Soude caustique, ciments
4.6 Sels	Brouillards salins	Nitrates, phosphates, chlorures, sulfates	Chlorures de sodium	Chlorures de calcium, sulfates, plâtre
4.7 Matières inertes	Poussières, suies	Calcaire, silice	Graisses, huiles, encres, poussières	Graisses, huiles, poussières, suies
5. Agents biologiques				
5.1 Végétaux	Bactéries, graines	Bactéries, moisissures, champignons, racines	Bactéries, plates domestiques	
5.2 Animaux	Insectes, oiseaux	Rongeurs, vers	Animaux domestiques	

TAB. 5.2 – Agents influençant le bâtiment (source : Norme ISO 6241 :1984, table 4)

5.1 Usure mécanique

La contrainte *Usure mécanique* représente les sollicitations de frottement de corps en mouvement entraînant une diminution de la matière par abrasion. Ces dégâts peuvent être provoqués par toutes sortes d'actions liées à l'occupation d'un lieu. Les éléments les plus soumis à cette contrainte sont les sols sur lesquels on marche ou on circule avec des engins. Dans une moindre mesure, une sollicitation d'usure peut aussi être constatée sur des murs d'appartements, de bureaux, dans des zones de circulation etc. lorsque les occupants frôlent les murs en se déplaçant ainsi que sur toute autre surface soumise au frottement, par exemple par un nettoyage mécanique.

Selon Addleson et Rice (1991), l'abrasion est influencée par trois facteurs¹ :

1. *La durée pendant laquelle le frottement a lieu ;*
2. *Les caractéristiques de surfaces des deux matériaux en contact ;*
3. *La résistance au frottement (c.-à.-d. friction) des deux surfaces. Le dernier point est directement dépendant des propriétés de surface de matériaux et de la pression exercée pendant le frottement.*

Concernant l'action exercée par l'environnement sur un composant on peut retenir l'influence de la durée (point 1) ainsi que les caractéristiques de l'objet frottant (dureté et pression). Ces actions sont amplifiées si des agents abrasifs tels que des poussières, de la saleté ou des gravillons se trouvent entre les deux objets frottants.

Organisation	Norme	Année	Matériaux	Méthode d'essai
ISO	5470-1	1999	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique	Appareil d'essai d'abrasion Taber
ISO	7784-1	1997	Peintures et vernis	Méthode utilisant une roue revêtue de papier abrasif
ISO	12947-1	1998	Textiles	Méthode Martindale
ISO	23337	2007	Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique	Machine de Lambourn perfectionnée
ISO	24338	2006	Revêtements de sol stratifiés	Taber
ISO	10545-7	1996	Carreaux et dalles céramiques	

TAB. 5.3 – Normes déterminant la résistance à l'abrasion

Pour déterminer la résistance à l'abrasion de certaines familles de matériaux utilisés en tant que revêtement de sol, diverses procédures de mesure ont été établies et normalisées (voir tableau 5.3). Dans ces essais, les échantillons sont soumis à un frottement provoqué par des disques tournant ou par des cylindres munis de papier de verre spécifique dont le pouvoir abrasif est connu. Le nombre de tours et représentatif pour la fréquence d'exposition.

Le tableau 5.4 montre comment, par l'introduction de classes, les essais définis dans la norme ISO 10545-7 (1996), peuvent être mis en relation avec des sollicitations réelles que l'on rencontre sur les sols.

Echelle

Pour la modélisation, les niveaux de la contrainte *Usure mécanique* ont été définis de manière similaire aux classes de la norme ISO 10545-7. Ceci en tenant compte également d'autres situations d'exposition que le sol. Ils sont indiqués dans le tableau 5.5. Pour l'attribution des niveaux il faut tenir compte de la nature des objets frottants, de la fréquence de cette sollicitation ainsi que de la présence d'agents abrasifs.

Une particularité de la contrainte *Usure mécanique* est qu'elle n'agit qu'en surface, c.-à.-d. que son action

¹Addleson et Rice (1991), Chapitre STRENGTH AND MATERIALS IN USE, Abrasion, p.120.

Classe	Nb de tours	Utilisation typique
0	100	Valeur théorique uniquement
1	150	p.ex. à pied nus ou en pantoufles
2	600	p.ex. sollicitation légère dans l'habitat
3	750/1500	p.ex. dans tous les habitats et balcons
4	6000/12000	p. ex. sollicitations accrues dans les entrées d'immeubles
5	>12000	sollicitations maximales, p.ex. garages

TAB. 5.4 – Classes de sollicitations pour des carreaux de dalles émaillés
(source : ISO 10545-7 :1996)

Niveau	Éléments significatifs	Objets	Fréquence	Agents abrasifs
0	Éléments enterrés		Nulle	
1	Plafonds	Outils de nettoyage	Rare	
2	Murs de locaux non occupés	Outils de nettoyage	Rare	
3	Sols de locaux non occupés	Humains avec chaussures	Rare	Poussière, saleté
4	Murs chambres, toitures en pente	Objets divers	Occasionnelle	
5	Murs de bureaux ou couloir villa	Objets divers	Occasionnelle (3-10 personnes)	
6	Sols salon, salle de bain	Humains avec chaussures de maison	Régulière	Poussière
	Murs atelier	Objets divers	Régulière	Saleté
7	Sols de grenier	Humains avec chaussures de ville	Rare	Poussière, saleté
	Chambres	Humains avec chaussures de maison	Régulière (1-2 personnes)	Poussière
8	Sols de piscine	Pieds nus	Soutenue	Poussière
9	Escaliers public, sols salle de classe	Humains avec chaussures de ville	Très soutenue (foule)	Poussière, saleté
10	Sols extérieur	Humains avec chaussures sales, engins sur roues	Régulière à très soutenue	Saleté, gravillons
	Sols industriels	Humains avec chaussures sales, engins sur roues	Régulière	Saleté, gravillons

TAB. 5.5 – Niveaux de la contrainte *Usure mécanique*

agit uniquement sur les matériaux périphériques de l'élément multicouche.

Principalement, l'*Usure mécanique* diminue la performance *Épaisseur*. Toutefois, dans des cas particuliers, elle peut également avoir une influence sur la nature de la surface ainsi que sur la transparence d'un matériau.

Initialisation

La figure 5.1 montre l'algorithme pour déterminer la contrainte *Usure mécanique* à partir des configurations de milieux extérieurs. Ainsi la contrainte est 0 pour des milieux enterrés, immergés ou protégés et 0.2 pour des plafonds. Pour les éléments en contact avec des milieux "habités" comme les zones de circulation, les dalles de balcon ou des toitures terrasse le niveau est pondéré en fonction de la fréquentation. Pour les autres types d'élément elle est 2.

Procedure Init Usure Mécanique Ext				
U:=0				
IF Enterré OR Immergé OR Protégé contre chocs				
THEN	ELSE			
U:=0	IF Face=dessous			
	THEN	ELSE		
	U:=0.2	IF Type d'élément=Circulation ext.or Balcon or Terrasse		
		THEN	ELSE	
		CASE Fréquentation OF		U:=2
		Nul	Occasionnelle	Passante
				Foule
		U:=3	U:=6	U:=8
				U:=10

FIG. 5.1 – Règles pour déterminer la contrainte *Usure mécanique* d'un milieu extérieur

L'algorithme pour les milieux intérieurs est représenté dans la figure 5.2. Comme pour les milieux extérieurs, la contrainte est 0 pour des milieux enterrés et 0.2 pour des plafonds. Dans les autres situations, le niveau de la contrainte est pondéré en fonction des paramètres *Fréquentation*, *Intensité d'occupation* et *Activité*.

Procedure Init Usure Mecanique Int				
U:=0				
IF Protégé contre les chocs				
THEN		ELSE		
U:=0		IF Face=dessous		
THEN		ELSE		
U:=0.2		U:=1		
		CASE Fréquentation OF		
		Frequente	Moyenne	Occasionnel
		U:=U * 1.71	U:=U * 1.6	U:=U * 1.4
		IF Intensité d'occupation<>Nul		
		THEN		
		CASE Taux d'occupation OF		
		Fort	Faible	
		U:=U * 1.71	U:=U * 1.3	
		CASE Activité OF		
		Sport,Lourde	Legere	Calme,Sommeil
		U:=U * 1.71	U:=U * 1.5	U:=U * 1.4

FIG. 5.2 – Règles pour déterminer la contrainte *Usure mécanique* d'un milieu intérieur

5.2 Délavage

La contrainte *Délavage* représente les sollicitations liées à l'abrasion des matériaux par l'eau ruisselante. Cette contrainte apparaît surtout sur des éléments exposés à la pluie et à la pluie battante² tels que les toitures et les façades. Les matériaux sensibles à ce type de sollicitations sont les peintures, les matériaux tendres comme les mousses et laines isolantes, les bois, les bois reconstitués, des mortiers de chaux etc.

Les facteurs qui déterminent l'intensité d'exposition à cette contrainte sont :

- l'orientation par rapport aux vents dominants et aux précipitations,
- la hauteur d'étage et
- la pente.

Echelle

Le tableau 5.6 montre l'échelle de niveaux choisie pour quantifier les différents type d'exposition de la contrainte *Délavage*.

Niveau	Éléments significatifs	Pente
0	Éléments enterrés, milieu intérieur ³	
1	Plafonds	0°
2	Façade peu exposée	90°
3	Façade moyennement exposée	90°
4	Façade exposée	90°
5	-	
6	Toit 45° non exposé	45°
7	Façade très exposée	90°
8	Parois 30°	30°
9	Toiture exposée, parois 15°	15°
10	Toiture plate et en pente exposée	0°

TAB. 5.6 – Niveaux de la contrainte *Délavage*

Comme la contrainte *Usure mécanique*, cette contrainte n'agit qu'en surface, c.-à.-d. sur les matériaux périphériques de l'élément multicouche. Elle provoque une diminution de l'épaisseur de la couche.

La contrainte *Délavage* n'est pas à confondre avec la contrainte *Mouillage*, qui représente les sollicitations liées à des infiltrations d'eau.

²Par pluie battante on entend une précipitation accompagnée de forts vents qui peut atteindre des endroits normalement protégés des pluies "normales".

³On admet qu'à l'intérieur d'un bâtiment il n'y a normalement pas d'eau en mouvement et chargé de matières abrasives. C'est pourquoi, dans ces milieux, la contrainte *Délavage* est égale à 0.

Initialisation

La figure 5.3 montre la procédure pour initialiser la contrainte *Délavage* dans un milieu extérieur. Cet algorithme Attribue la valeur 0 lorsqu'il s'agit de milieux enterrés ou immergés.⁴ Pour les autres milieux, le niveau est d'abord pondéré en fonction de la pente. Pour les éléments avec une pente de plus de 45°, le calcul tient aussi compte de l'orientation et pour les éléments verticaux il y a une pondération en fonction de la hauteur. En cas d'absence de protection contre le vent ou la pluie, le niveau de contrainte des parois verticales est majoré.

Procédure Init Délavage					
IF Protection contre l'eau or Enterré or Immergé					
THEN	ELSE				
Dél:=0	Dél:=1				
	CASE Round(Pente) OF				
	0°	15°	30°	45°	
	IF Face="B"	Dél:=9	Dél:=8	Dél:=5.62	
	THEN	ELSE			
	Dél:=0{plafonds}	Dél:=10			
	IF Pente=90°				
	THEN				ELSE
	CASE Étage OF				
	Ssol, Rez	Bas	Moyen	Haut	
	Dél:=Dél * 1.5	Dél:=Dél * 1.6	Dél:=Dél * 1.7	Dél:=Dél * 1.78	
IF not Protection contre le vent					
THEN			ELSE		
Dél:=Dél * 1.2					
IF not Protection contre la pluie					
THEN			ELSE		
Dél:=Dél * 1.78					
IF Pente>=45°					
THEN				ELSE	
CASE Orientation OF					
W	ELSE				
Dél:=Dél * 1.78	Dél:=Dél * 1.5				

FIG. 5.3 – Règles pour déterminer la contrainte *Délavage* d'un milieu extérieur

Pour les milieux intérieurs, le niveau de la contrainte *Délavage* est 0.

⁴Ceci parce-ce qu'on suppose que le mouvement d'eau y est très faible et n'exerce pas de forces abrasives sur les matériaux. Les autres dégradations liées à la présence d'eau dans ces milieux sont calculées en fonction de la contrainte *Mouillage*.

5.3 Chocs et Poinçonnement

Des éléments de construction, exposés à toutes sortes d'activités ou des intempéries, sont également soumis à des impacts mécaniques. Ces impacts peuvent survenir lors d'une utilisation courante ou de façon sporadique en cas d'accidents ou en cas de vandalisme.

Selon Addleson et Rice (1991), un impact se produit lorsque deux objets entrent en collision. Pour cela, au moins un des deux objets doit être en mouvement. Dépendant de la résistance relative des matériaux ainsi que de l'intensité des forces résultantes, cela peut endommager les objets. Lors d'un impact, les contraintes mécaniques ponctuelles sont momentanément bien supérieures à celles résultant de charges statiques, ce qui peut provoquer des déformations permanentes ou des ruptures.

La norme anglaise BS 8200 :1985, cité dans Addleson et Rice (1991), distingue entre deux types d'impact : L'impact d'un corps dur (hard body) et l'impact d'un corps mou (soft body)⁵. Selon Cziesielski et Vogdt (2000), la norme ISO 7892 :1988 distingue également ces deux types de chocs (impacts d'objets petits et durs et impacts de corps gros et mou) pour fixer les exigences mécaniques des parois avec isolation périphérique⁶.

Au niveau des contraintes utilisées dans la simulation, nous distinguons également entre ces deux types de contraintes. Les impacts d'objets petits et durs sont représentés par la contrainte *Poinçonnement* alors que les impacts de corps gros et mou sont simulés par la contrainte *Chocs*.

La contrainte *Poinçonnement* peut être assimilée à des sollicitations telles que des chutes de grêlons, le jet de pierre, des objets qui tombent ou la marche avec des chaussures à talons-aiguilles. Ces sollicitations peuvent provoquer des éclats, des perforations, des déformations et des fractures. Les conséquences qui en résultent sont la perte d'étanchéité, la dégradation de l'aspect ou la ruine du matériau.

La contrainte *Chocs* représente des actions comme des personnes s'appuyant contre un mur ou s'asseyant, le dépôt temporaire d'objets lourds par terre ou contre un mur et la circulation à pied ou avec des véhicules sur des sols. Dans certains cas, les forces du vent peuvent également provoquer ce type de sollicitations. Les dommages causés par ces chocs peuvent être des déformations irréversibles, des fissures, la fragilisation et la casse ayant comme conséquence des dégradations d'aspect, la perte d'étanchéité, la perte de résistance statique ou la ruine.

Diverses normes et recommandations nationales et internationales décrivent des procédures pour simuler des chocs de manière répétitive et normalisée. Ceci dans le but de mesurer certaines des caractéristiques spécifiques à un matériau.

La diversité des caractéristiques et des façons d'exprimer l'intensité de l'impact rend leur comparaison difficile.

La recommandation SIA V280 ⁷ décrit plusieurs installations d'essais pour mesurer les caractéristiques des lés d'étanchéité en polymère. Parmi ces essais il y a l'essai n°9 IMPACT DE LA GRÊLE et l'essai n°15 RÉSISTANCE À LA PERCUSSION qui simulent des contraintes de chocs.

Dans le premier essai (n°9 - Impact de la grêle, fig. 5.4.a), la percussion se fait à l'aide d'une bille en polyamide (PA 6.6) d'un diamètre de 40 mm et d'une masse de (38.5 ± 0.5) g. L'intensité de l'impact est exprimé soit par la vitesse d'une balle de tir normalisée, soit par l'énergie cinétique de la balle au moment de l'impact. L'impact est augmenté en augmentant la vitesse de tir. Un lé polymère utilisé comme étanchéité de toiture doit résister à des vitesses de tir de 17 m/s ce qui correspond à une énergie cinétique de 5 joules.

⁵Addleson et Rice (1991), p.125

⁶Cziesielski et Vogdt (2000), p.18

⁷SIA V280 (1996) - Lés d'étanchéité en matière synthétique (lés polymères) - Performances exigées et essais des matériaux.

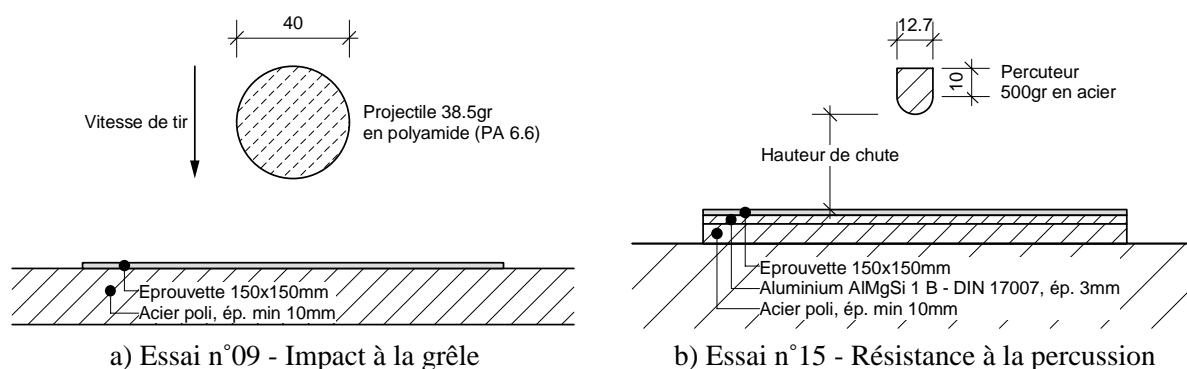


FIG. 5.4 – Essais de chocs pour des lés d'étanchéité en matière synthétique
(source : Recommandation SIA V280)

Le deuxième essai (n°15 - Résistance à la percussion, fig. 5.4.b) utilise comme percuteur une pièce en acier de 500gr avec une tête ronde d'un diamètre 12.7mm. L'intensité d'impact est exprimée par la hauteur de chute libre du percuteur. Une étanchéité de toiture en polymère doit résister à des hauteurs de chute de 300 *mm* ce qui correspond à une énergie cinétique de 1.5 joules.

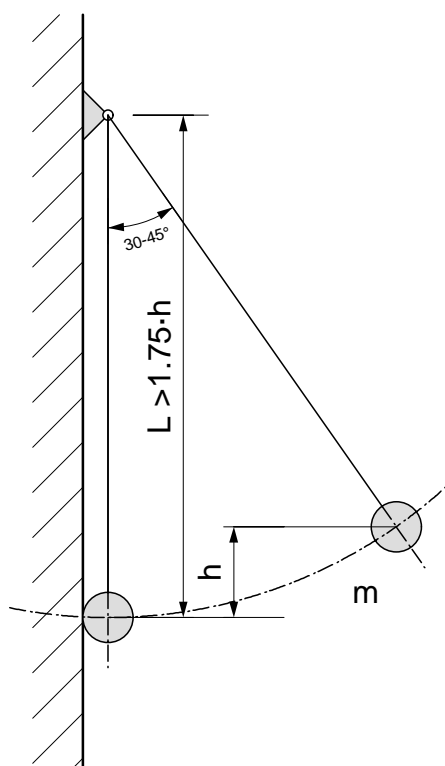


FIG. 5.5 – Essais de Pendule pour déterminer la résistance aux chocs selon la norme ISO 7892
(source : Cziesielski et Vogdt, 2000, Abb. 2.2.1, p.19)

Cziesielski et Vogdt (2000) décrivent également une méthode pour tester la résistance aux chocs (Stossfersigkeit) de crépis posés sur des isolations périphériques selon la norme ISO 7892 :1988. Ici, l'essai se fait sur place et l'impact est simulé à l'aide d'un pendule (figure 5.5). L'intensité de l'impact est indiquée par l'énergie cinétique en Joules. Selon la loi de la conservation d'énergie, l'énergie cinétique maximale du pendule est proportionnelle à la hauteur de départ.

$$E_{cin} = m \cdot \frac{v^2}{2} = E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (5.1)$$

avec :

- m masse du pendule en [kg]
- v vitesse du projectile en [m/s]
- g accélération terrestre 9.18 [m/s²]
- h hauteur de départ du pendule en [m]

La norme anglaise BS 8200 :1985 propose la méthode du pendule pour créer des impacts reproductibles contre des murs verticaux. Dans l'essai avec un corps dur on utilise un pendule avec des sphères en acier de 500gr ou 1kg. L'essai avec un corps mou est fait avec une poche sphérique d'env. 40cm de diamètre et d'un poids de 50kg. Pour donner un caractère mou, la poche est remplie avec des billes de verre de 3mm de diamètre⁸. L'intensité de l'impact est également exprimée par l'énergie en [J] ou en [Nm].

Echelle

Les niveaux pour les contraintes *Chocs* et *Poinçonnement* ont été définis en relation avec l'énergie de l'impact. S'agissant aussi d'une sollicitation mécanique, produite principalement par l'activité humaine, l'échelle a été définie de façon à ce que, pour une même activité, on retrouve les mêmes niveaux de contraintes que la contrainte *Usure mécanique*.

Le tableau 5.7 montre la correspondance entre les niveaux, l'énergie d'impact, quelques sollicitations typiques et des éléments significatifs.

Niveau	Energie [J]	Sollicitation typique	Éléments significatifs
0	≤0.02	Aucune	
1	0.05	Toucher	Plafonds et murs occupation nulle
2	0.1	Coup de poing	Murs occupation nulle
3	0.2	Marche	Sols occupation nulle, mur bureau
4	0.5	Sauts rares	Murs chambre, toit plat inutilisable
5	1.0	Sauts fréquents	Murs atelier
6	2.0	Chute de billes (grêlons)	Sols salon
7	5.0	Chute de vaisselle	Sol de cuisine et salle de bain
8	10	Chute de bouteilles	Sols de piscine, gym et balcon
9	20	Chute de marteau	Escaliers publics, sol de classe
10	≥50	Chute de pièce de machines	Sol extérieur, sol industriel

TAB. 5.7 – Niveaux de la contrainte *Chocs*

Initialisation

Les règles, pour définir le contrainte *Choc* sur les faces, sont présentées dans la figure 5.6. Si l'élément est protégé contre les chocs, le niveau est 0. Sinon il est d'abord défini avec les mêmes algorithmes que la contrainte *Usure mécanique* (voir figures 5.1 et 5.2). Pour les milieux extérieurs, cette valeur est corrigée en fonction de la fréquentation. Cette adaptation est faite pour des soubassements, vitrages ou verrières qui sont exposés aux coups de pied ou d'autres chocs de par leur proximité avec le sol.

Le niveau de contrainte *Poinçonnement* initialisé est les identique qu'au niveau de la contrainte *Chocs*.

⁸Addleson et Rice (1991), p.125

Procedure Init Chocs Ext				
IF NOT Protégé contre chocs				
THEN				ELSE
Chocs:=Usure mécanique				Chocs:=0
IF Element=Soubassement OR Vitrage OR Verriere AND Étage=Rez				
THEN			ELSE	
CASE Fréquentation OF				
Nulle	Occasionnelle	Passante	Foule	
Chocs:=2	Chocs:=4	Chocs:=7	Chocs:=10	

FIG. 5.6 – Règles pour déterminer la contrainte *Choc* d'un milieu extérieur

5.4 Mouillage

Parmi les actions qui interviennent dans la dégradation des matériaux, la présence d'eau, dans ses différents états, gaz, liquide ou solide, occupe assurément la place la plus importante. Addleson et Rice (1991) consacrent d'ailleurs un chapitre entier (Part 3 Water and its effects) à cet agent.

En effet, un grand nombre de matériaux de construction "craignent" la présence d'eau, qu'elle soit permanente ou temporaire. Les plâtres non-traités foisonnent et perdent leur solidité, les bois non-traités gonflent, les matériaux fibreux et poreux se gorgent d'eau, les métaux corrodent etc.

Les éléments de construction peuvent entrer en contact avec l'eau provenant de plusieurs origines et ayant des caractéristiques multiples :

- *Eau de précipitations* (pluie, neige, grêle)
Elle est douce et ne contient pas de sels minéraux. Généralement neutre ($\text{pH} \approx 7$), elle peut aussi être légèrement acide ($\text{pH}=5-6$) dans les régions dont l'air est pollué. Les éléments exposés sont tous ceux étant hors terre et non abrités de la pluie tels que toitures, façades, surfaces de circulation, terrasses etc.
- *Eaux souterraines* (eau de terrain, nappe phréatique)
Elles sont généralement chargées de sels minéraux et neutres. En région maritime elles peuvent également être salées. Les éléments exposés sont les murs de soutènement ainsi que les éléments enterrés ou semi-enterrés. Parfois elles sont sous pression.
- *Eaux de cours d'eau* (lacs, rivières, mer)
Elles sont douces ou salées avec une valeur-pH dépendant du niveau de pollution du cours d'eau. Les éléments exposés sont des fondations ou murs placés dans l'eau. Leur pression dépend de la hauteur d'eau.
- *Humidité contenue dans l'air* (vapeur d'eau ou eau de condensation)
Elle est douce et neutre. Les parties exposées sont celles dont la température tombe en dessous du point de rosée local et la vapeur d'eau se condense. Parmi les matériaux sensibles à l'humidité, on peut citer les ligneux et les métaux. Les ligneux car leur taux d'humidité varie en fonction de l'humidité relative ambiante. Les métaux car leur vitesse de corrosion dépend de ce paramètre⁹.
- *Eaux d'éléments architecturaux ou techniques* (bassins, piscines, réservoirs)
Dépendant de leur utilisation, elle ont une valeur-pH neutre ou légèrement acide si elles sont chargées de chlorures ce qui est p.ex. le cas des eaux de piscines. Les éléments exposés sont les parois de piscines, murs de bassins et de fontaines etc. Leur pression dépend de la hauteur d'eau.
- *Eaux provenant d'activités* (douche, cuisine, bain, nettoyage)
De qualité potable, ses caractéristiques dépendent de sa provenance. Ayant une valeur-pH neutre, elle peut contenir des sels minéraux si elle est captée en souterrain. Atteignant les éléments de construction généralement après son "utilisation", elle peut également contenir d'autres produits tel que savons, huiles, graisses etc.

De l'extérieur, l'eau pénètre dans la matière et se propage à travers les couches sous forme liquide ou sous forme de vapeur d'eau. Les trois phénomènes responsables de cette pénétration sont :

- l'écoulement d'eau dans les grands pores, fentes, fissures, percements etc. induit par la force de gravité ou des courants d'air,
- le déplacement de liquide par effet de capillarité et
- la diffusion de vapeur induite par des différences de pressions partielles.

L'eau ressortant à la surface d'un élément *stagne* ou s'évacue par *écoulement* ou par *évaporation*.

Les phénomènes de dégradations dépendant de la présence d'eau sont également multiples :

- *Altérations mécaniques* : Une dislocation de la matière par éclatement peut être provoquée par des cycles gel-dégel, par des cycles mouillage-séchage ou par des efflorescences. D'autres matériaux se

⁹ Voir norme ISO 9223 (1992), Classe de durée de persistance de l'humidité

déstructurent, ramollissent et perdent leur résistance mécanique en contact avec l'eau. La présence d'eau en mouvement a également un effet abrasif sur les matériaux et délave la surface.

- Décompositions *chimiques* : Les plus importantes des réactions chimiques sont les réactions de corrosion. Elles affectent principalement les métaux, notamment les métaux ferreux.
- Perte de caractéristiques *thermiques* : Le pouvoir isolant est généralement obtenu par l'enfermement d'air à l'intérieur de la matière. La propagation de l'eau à l'intérieur des matériaux utilise ses mêmes pores ce qui provoque inévitablement une perte de la résistivité thermique.
- Décompositions *biologiques* : L'eau étant un des éléments fondamentaux de toute forme de vie, sa présence crée des conditions favorables pour le développement d'algues, bactéries etc.

Echelle

Les différentes formes d'humidité, eau ou vapeur, sont représentées dans le modèle par la contrainte *Mouillage*. Etant donnée le large éventail de possibilités de cette présence d'eau, les niveaux de la contrainte *Mouillage* ont été définis entre les deux extrêmes. Le niveau minimal 0 correspond à des conditions sèches alors que le niveau 10 représente un environnement où l'eau sous haute-pression est présente en permanence. Le tableau 5.8 montre la correspondance entre les niveaux définis pour la modélisation et les conditions de présence d'eau.

Niveau	Condition	Éléments significatifs
0	HR <50%	Humidité nulle
1	HR rarement >80%	Murs secs
2	HR rarement ≈100%	Plafond douche
3	HR fréquemment ≈100%	Caves
4	Présence d'eau rare	Mouillage rare, soubassements
5	Présence d'eau occasionnelle	Sols int. lavables, façades peu exposées
6	Présence d'eau régulière	Façade très exposée, murs contre terre
7	Présence d'eau régulière, h=1mm	Toit en pente
8	Présence d'eau régulière, h=10mm	Toit plat, chenaux
9	Présence d'eau constante, h=2m	Bassin, piscine
10	Présence d'eau constante, h>2m	Haute pression, canalisation

TAB. 5.8 – Niveaux de la contrainte *Mouillage*

note : HR = humidité relative

Il est également important de rappeler que la contrainte *Mouillage* n'est pas à confondre avec la contrainte *Délavage*. Cette dernière représente uniquement le pouvoir abrasif de l'eau en mouvement.

En plus, la contrainte *Mouillage* est utilisée pour déterminer le risque de gel, le risque de pourriture ou d'autres altérations de certains matériaux de construction lorsqu'ils sont en contact avec l'eau. Dans ces cas une nouvelle contrainte est calculée par combinaison avec d'autres contraintes telles que *Courants d'air* ou *Température* (voir points 5.11 - Gel et 5.12 - Pourriture)

Initialisation

Les règles pour calculer le niveau de containte *Mouillage* d'un milieu extérieur sont montrées dans la figure 5.7. Pour les milieux immergés et enterrés ainsi que pour des éléments protégés le niveau est assigné directement. Pour les parois verticales la valeur initiale est adaptée en fonction de l'étage ainsi que d'éventuelles protections contre le vent ou la pluie. Ensuite la valeur est adaptée en fonction de l'orientation et de la pente de l'élément.

Pour les milieux intérieurs, la détermination du niveau de contrainte se fait selon l'algorithme de la figure 5.8. Si l'élément n'est pas protégé contre le mouillage, ce sont des options *Amnée d'eau*, *Humidité* et *Inondation* du milieu intérieur qui déterminent le niveau.

Procédure Init Mouillage ext									
IF Immergé									
THEN		ELSE							
M:=10		IF Enterré							
		THEN		ELSE					
		M:=6		IF Protège_contre_l'eau					
				THEN		ELSE			
				M:=0		M:=4			
				IF Pente>=90°					
				THEN					
				ELSE					
				CASE Étage OF					
				moyen		haut			
				M:=M · 1.1		M:=M · 1.2			
				IF Protégé contre le vent					
				THEN		ELSE			
				M:=M · 0.8					
				IF Protégé contre la pluie					
				THEN		ELSE			
				M:=M · 0.5					
				IF Inclinaison>=45°					
				THEN					
				ELSE					
				CASE Orientation OF					
				W		ELSE		M:=M · 1.5	
				M:=M · 2		M:=M · 1.5			
				CASE Inclinaison OF					
				0°		15°		30°	
						45°		90°	
				IF côté=dessous		M:=M · 1.8		M:=M · 1.6	
				THEN		ELSE		M:=M · 1.4	
				M:=0.5		M:=M · 2.5		M:=M · 0.8	
Mouillage:=M									

FIG. 5.7 – Règles pour déterminer la contrainte *Mouillage* d'un milieu extérieur

Procedure Init Mouillage_Int		
IF Exposition.ProtEau		
THEN ELSE		
M:=0	IF Amenée d'eau OR Humidité OR Inondation	
	THEN	ELSE
	M:=1	M:=0
	IF Amenée d'eau	
	THEN	ELSE
	M:=1.8	
	IF Humidité	
	THEN	ELSE
	M:=Result * 1.7	
	IF Inondation	
	THEN	ELSE
M:=Result * 2		
Mouillage:=M		

FIG. 5.8 – Règles pour déterminer la contrainte *Mouillage* d'un milieu intérieur

5.5 Polluants

Lorsque les surfaces des éléments de construction ne sont pas nettoyées régulièrement, on peut constater après un certain temps le dépôt de poussières, particules etc. Ces sollicitations, provenant de l'air ou de l'eau de pluie et provoquant des salissures et encrassements, sont regroupées dans la contrainte *Polluants*.

Une partie des polluants sont véhiculés par l'atmosphère sur des grandes distances. Parmi eux on peut citer :

- les suies provenant de la combustion incomplète de bois, charbon ou mazout et diesel (SO_2) ;
- les poussières provenant de l'érosion de sols ou d'une activité volcanique (sable fin du Sahara amené en Europe) ;
- les particules d'origine biologique (pollen, spores) ;
- les poussières provenant d'une activité (route, chemin de fer, travaux artisanaux ou industriels etc.) ;
- la pollution par sel contenue dans l'air sous forme de chlorure¹⁰.

En général, ces polluants atteignent la peau d'un bâtiment sous forme de particules. Dans certains cas, ils sont liés dans les gouttelettes d'eau des nuages et tombent avec la pluie. Dans le cas de présence de suies de combustion par contre, l'eau de pluie dissout le dioxyde de soufre SO_2 et se transforme en pluie acide. Ce type de pollution, encore très répandu dans la première moitié du XX^e siècle, était dû à des chaudières de charbon et a pu être diminué fortement depuis, grâce à l'apparition d'autres formes d'énergie. Néanmoins, il a provoqué des dégâts considérables sur les pierres naturelles d'un grand nombre de bâtiments historiques.

D'autres sources de pollution sont dues à une activité humaine proche telle que :

- les poussières des routes, chemin de fer, travaux artisanaux ou industriels etc.
- les salissures dans les ateliers, cuisines etc.

Les polluants agissent principalement sur l'aspect ou la transparence des éléments de construction. Pour certains d'entre eux, le contact avec l'eau peut créer un milieu acide augmentant fortement la vitesse de corrosion des métaux.

La quantité de polluants se déposant sur la surface de l'élément de construction dépend du type et de la fréquentation du milieu environnant, mais aussi de l'inclinaison et de la rugosité de la surface.

Le vent et les intempéries ont un effet nettoyant qui diminue cette contrainte.

Echelle

L'échelle des niveaux de la contrainte *Polluants* est représenté dans le tableau 5.9.

Niveau	Elément significatif
0	Nul
1	Plafond chambre
2	Plafond cuisine collective
3	Murs atelier public pollué
4	Murs cuisine collective
5	Sol atelier public pollué
7	Sol de cuisine collective
8	Toit 30° dans site pollué
9	Toit 15° dans site pollué
10	Sols int et ext. les plus encrassés, toit plat

TAB. 5.9 – Niveaux de la contrainte *Polluants*

¹⁰Voir ISO 9223 (1992)

Initialisation

L'algorithme pour le calcul du niveau de contrainte *Polluants* à la surface dans un milieu extérieure est montré en figure 5.9. Le niveau est déterminé par principalement déterminé par le type d'environnement et la fréquentation du milieu et la pente de l'élément.

Function Init_Polluants_Ext			
Poll:=1			
CASE Fréquentation OF			
Fréquenté		Moyenne	
Poll:=Poll * 1.58		Poll:=Poll * 1.5	
IF Enterré or Immergé			
THEN		ELSE	
Result:=0		CASE Environnement OF	
		Artère	Carrefour Rue
		Poll:=Poll * 2.51	Poll:=Poll * 1.58 Poll:=Poll * 1.2
IF Présence de polluants			
THEN		ELSE	
Poll:=Poll * 2.51			
CASE Pente OF			
0°		15°	30° 45°
IF Face=dessous		Poll:=Poll * 1.5	Poll:=Poll * 1.35 Poll:=Poll * 1.2
THEN		ELSE	
Poll:=Poll * 0.5		Poll:=Poll * 1.58	

FIG. 5.9 – Règles pour déterminer la contrainte *Polluants* d'un milieu extérieur

Pour un milieu intérieur ce sont les règles de la figure 5.10 qui définissent le niveau à la surface. Ici se sont la fréquentation, l'intensité d'occupation et le type d'activité du milieu qui influencent principalement le niveau de contrainte.

Function Init_Polluants_Int		
Poll:=1		
CASE Fréquentation OF		
Fréquenté		Moyenne
Poll:=Poll * 1.58		Poll:=Poll * 1.5
IF Fréquentation<>Nul		
THEN		ELSE
CASE Intensité d'occupation OF		
Fort		
Poll:=Poll * 1.58		
CASE Activité OF		
Sport	Lourde	Légère
Poll:=Poll * 1.5	Poll:=Poll * 1.58	Poll:=Poll * 1.2
IF Polluants		
THEN		ELSE
Poll:=Poll * 1.58		
IF Aération		
THEN		ELSE
Poll:=Poll * 0.7		

FIG. 5.10 – Règles pour déterminer la contrainte *Polluants* d'un milieu intérieur

5.6 Courants d'air

De manière générale, des courants d'air sont provoqués par un échauffement différentiel de couches d'air. Une augmentation de la température d'un volume d'air diminue sa densité, ce qui entraîne son déplacement selon la loi d'Archimède. Ces phénomènes peuvent être observés à toutes les échelles. Dans le domaine macro-climatique, cela entraîne de grands mouvements d'air à travers les océans et continents définissant le climat et la météo. A une échelle meso-climatique, des courants d'air locaux tels que des vents thermiques sont provoqués par le même type de phénomène.

Au niveau micro-climatique, c.-à.-d. proche de la surface d'un élément de construction, des micro-courants d'air ascendants ou descendants peuvent s'installer lorsque la température de surface diffère fortement de la température ambiante.

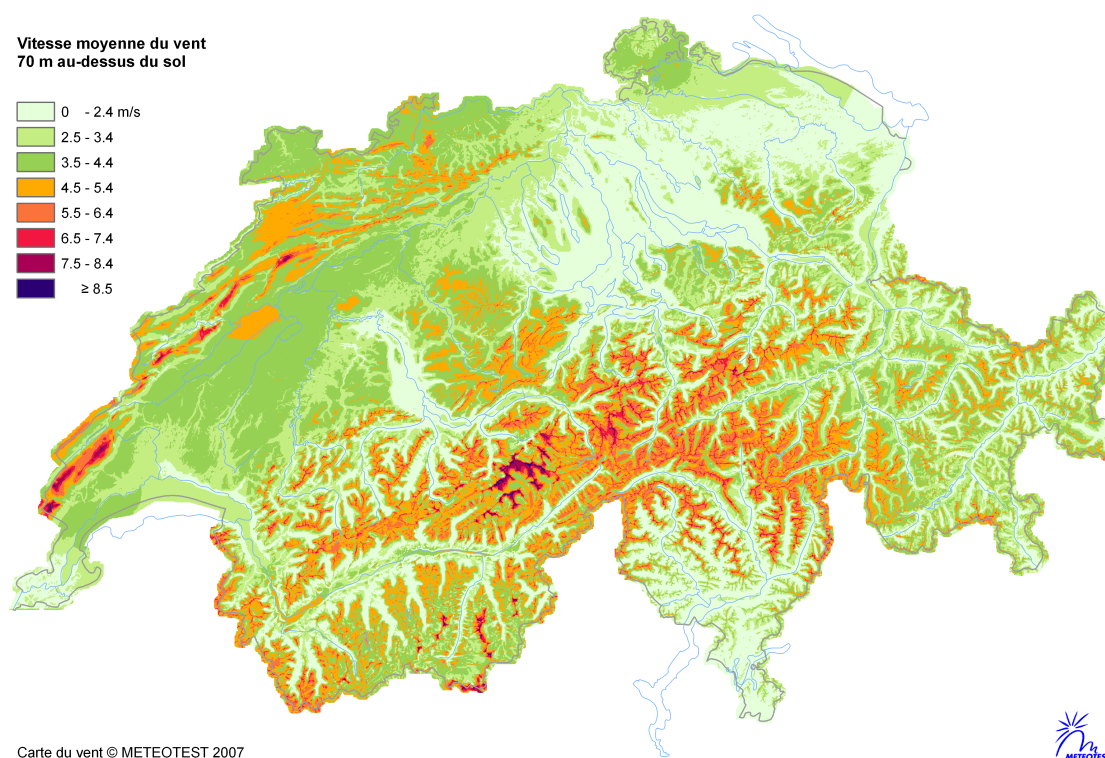


FIG. 5.11 – Carte des vents Suisse (source : www.wind-data.ch)

Courants d'air à l'extérieur

A l'extérieur, les courants d'air sont principalement provoqués par le vent. Des courants ascendants dus à des effets thermiques peuvent également apparaître à proximité d'une façade.

En altitude, la direction du vent est généralement parallèle à la surface terrestre et constitue un flux laminaire.

A proximité du sol par contre, ce flux est perturbé par la rugosité de la surface terrestre. En effet, une partie de l'énergie du vent est transformée en turbulences lorsqu'il rencontre des obstacles terrestres tel qu'arbres, haies, bâtiment etc. Ce qui a pour conséquence une forte diminution de la vitesse dans les zones proches du sol par rapport à la vitesse aux altitudes élevées. Les vitesses ainsi que les directions dans ces zones proches du sol sont aussi aléatoires et changent rapidement. C'est pourquoi la charge de vent proche du sol est exprimée avec une vitesse moyenne mesurée dans un laps de temps donné (exemple : échelle Beaufort, utilisée pour indiquer une vitesse de vent sur l'eau, correspond à une vitesse moyenne mesurée pendant 10 minutes).

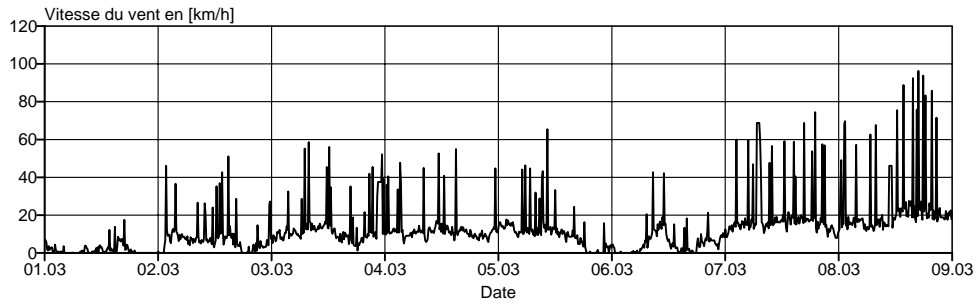


FIG. 5.12 – La vitesse du vent a des caractéristiques aléatoires
Vitesse du vent mesurée à 1.5m au-dessus du sol (année : 2010, moyenne sur 10 min)

Selon Dalglish et Boyd (1964), le profil de vitesses moyennes en fonction de la distance au sol, suit approximativement une courbe exponentielle dépendant de la nature d'occupation du sol et de la vitesse du vent en altitude.

$$v(h) = v_r \cdot \left(\frac{h}{h_r}\right)^k \quad (5.2)$$

avec :

- $v(h)$: vitesse du vent moyen à la hauteur h
- h : hauteur par rapport au sol
- h_r : hauteur de référence par rapport au sol (en général 10m)
- v_r : vitesse moyenne à la hauteur de référence h_r au-dessus du sol
- k : exposant dépendant du type de rugosité du sol

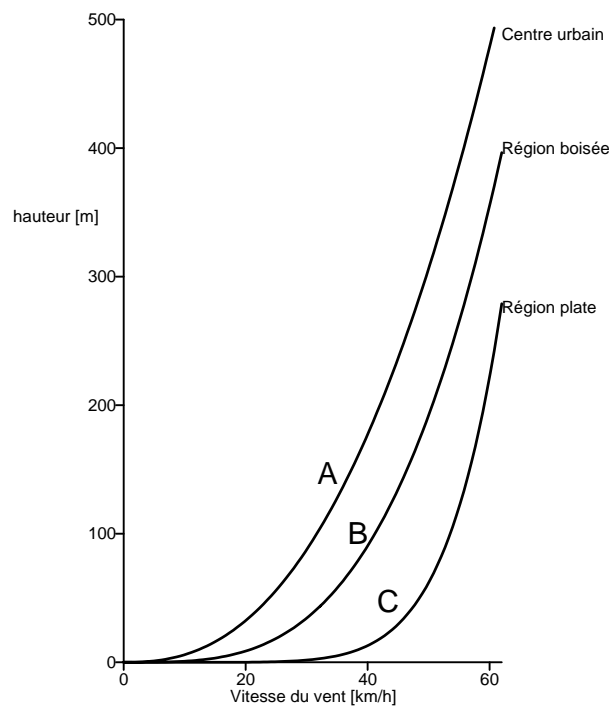


FIG. 5.13 – Profils de vitesses moyennes sur trois types de terrain pour un vent de 60 km/h

Selon Dalglish et Boyd (1964), on distingue communément entre trois types de rugosité du sol différents :

- A ($k=1/2$) Milieu urbain - Centre d'une grande ville avec une grande densité et des bâtiments moyens à hauts
- B ($k=1/4$) Région boisée, village, banlieue
- C ($k=1/7$) Région plate et dégarnie, région côtière plate

La figure 5.13 montre les profils de vent pour les différents cas avec une vitesse de vent en altitude de 60 [km/h].

Zhou, Kijewski et Kareem (2002) résument et comparent des codes et normes internationaux traitant des effets de charges de vent sur les grandes structures. Bien que les phénomènes étudiés ne soient pas les mêmes que ceux de l'étude de durabilité des matériaux, quelques principes concernant l'action du vent sur les bâtiments peuvent être repris de ces textes. Notamment les parties concernant le profil de la vitesse de vent moyen.

En analogie avec Dalglish et Boyd (1964), les différents codes et normes différencient les profils en fonction du type de terrain.

Cette comparaison met également en évidence que les différents codes et normes utilisent deux types élémentaires de description du profil de vitesse du vent, soit une loi logarithmique, soit une loi exponentielle. Néanmoins, les profils de vent fournis dans les documents étudiés peuvent être exprimés, de manière générale, dans une loi exponentielle suivante :

$$V(z) = V_0 \cdot b \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (5.3)$$

avec :

- z : hauteur par rapport au sol [m]
- V_0 : vitesse de vent moyen de référence pour un terrain ouvert et pour une hauteur z de 10 m
- b et α : constantes dépendantes du type de terrain.

Pour des milieux extérieurs, l'intensité de la contrainte *Courants d'air* dépend donc en priorité de la hauteur à laquelle l'élément de construction est posé. L'orientation de l'élément par rapport aux vents dominants ainsi que sa pente interviennent de manière secondaire.

Courants d'air à l'intérieur

A l'intérieur, les mouvements d'air sont générés par la ventilation naturelle induite soit par les vents externes soit par des effets de cheminée internes. Dans certains cas des installations de ventilation forcée peuvent également provoquer des courants. Comparés aux courants extérieurs, leur intensité est minimale mais pas nulle.

Désordres

La modélisation du vieillissement tient compte de ces actions de vent par l'introduction de la contrainte *Courants d'air*. Elle permet de tenir compte de phénomènes d'aération, d'infiltration d'air et d'autres effets liés aux courants d'air. Elle est utilisée pour déterminer :

- le défibrage de matériaux fibreux tel que les laines isolantes.
- l'assèchement de couches mouillées.

Echelle

L'échelle des niveaux de la contrainte *Courants d'air* a été définie à partir de plages de vitesse de vent. Suivant le principe que la vitesse du vent augmente avec la distance au sol, les niveaux peuvent également être mis en relation avec la hauteur en dessus du sol de l'élément. Le tableau 5.10 illustre la relation entre les niveaux, les plages de vitesse et le hauteur.

Niveau	Sollicitation typique	Eléments significatifs	Hauteur [m]	Vitesse [m/s]
0	Absence de courants d'air	Elément contre terre		0 - 0.15
1		Local fermé sans ventilation mécanique		0.15 - 0.6
2	Courants d'air	Local fermé avec ventilation mécanique		0.6 - 1.5
3		Local ouvert		1.5 - 2.5
4	Vent très faible	Hauteur < 1m	0 - 1	2.5 - 3.8
5				3.8 - 5.4
6	Vent faible	Hauteur > 1m rez - étage 3	1 - 10	5.4 - 7.4
7				7.4 - 9.6
8	Vent moyen	Etages 4-8	10 - 25	9.6 - 12
9				12 - 15
10	Fort vent possible	Etages 9 et plus	>25	>15

TAB. 5.10 – Niveaux de la contrainte *Courants d'air*

Initialisation

La figure 5.14 montre l'algorithme pour déterminer la contrainte *Courants d'air* à partir des configurations de milieux extérieurs. Celles-ci sont d'abord définies par de l'altitude de l'élément, l'intensité des courants d'air est ensuite adaptée en fonction de la pente et de l'orientation. La présence de mesures de protection contre le vent diminue l'intensité.

Procedure Init Courants Air Ext			
CASE Etage OF			
S-Sol,Rez	Bas	Moyen	Haut
CAir:=4	CAir:=6	CAir:=8	CAir:=10
IF Protection contre le vent			
THEN		ELSE	
CAir:=CAir * 0.8			
CASE Pente OF			
45°	30°	15°	0°
CAir:=CAir * 0.9	CAir:=CAir * 0.7	CAir:=CAir * 0.5	CAir:=CAir * 0.5
IF Pente>=45°			
THEN			ELSE
CASE Orientation OF			
N,S	W		
CAir:=CAir * 0.8	CAir:=CAir * 0.5		

FIG. 5.14 – Règles pour déterminer la contrainte *Courants d'air* des milieux extérieurs

Pour les milieux intérieurs, la contrainte est initialisée en tenant compte de la présence d'un système d'aération ou de courants d'airs (voir figure 5.15).

Procedure Init Courants Air Int	
IF Aération	
THEN	ELSE
CAir:=2	CAir:=1
IF Courant d'air	
THEN	ELSE
CAir:=CAir * 1.25	

FIG. 5.15 – Règles pour déterminer la contrainte *Courants d'air* des milieux intérieurs

5.7 Lumière

Exposé en milieu extérieur, les matériaux de construction sont soumis au rayonnement électromagnétique émis par le soleil. La distribution spectrale de ces radiations en forme de cloche correspond au rayonnement d'un corps noir de 5700°K selon la loi de Plank.

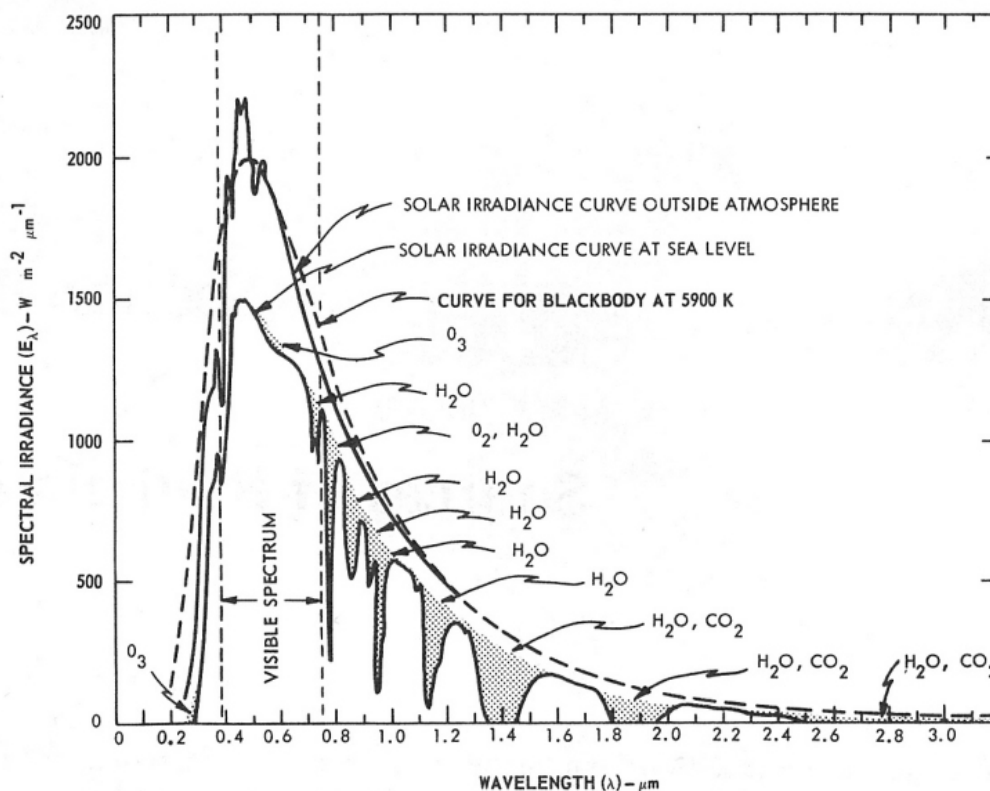


FIG. 5.16 – Radiation spectrale du soleil avec et sans absorption atmosphérique
(source : Valley, 1965)

Le spectre du rayonnement électromagnétique a été divisé en plusieurs régions correspondant aux propriétés et aux longueurs d'ondes.

Radiations ultraviolettes

L'énergie contenue dans la radiation augmente avec sa fréquence. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie d'un rayonnement augmente. Selon Ashton (1973) les radiations ultraviolettes (UV) au-delà de 350nm ont une énergie suffisante pour détruire des liaisons chimiques de carbone que l'on trouve dans les matériaux organiques. Elles sont à l'origine de nombreux désordres observés sur cette famille de matériaux.

La quantité de radiation de courte longueur d'onde nous parvenant depuis le soleil et atteignant la croûte terrestre est heureusement faible. A l'émission du soleil, les rayons UV constituent env. 10% de l'énergie de rayonnement total du soleil. Cette proportion est réduite dans l'atmosphère par l'effet sélectif de la couche d'ozone qui atténue d'avantage ces radiations que les autres parties du spectre. Au niveau de la mer et lorsque le soleil est au zénith, les UV ne représentent plus que 5 à 7% de l'énergie solaire. L'énergie décroît encore de façon importante avec la hauteur du soleil. Ainsi à 40° de latitude, le rayonnement des UV biologiques ($\lambda < 320nm$) des 4 mois d'hiver (nov. à fév.) est neuf fois plus petit que pendant les 4 mois d'été (mai à août). Nuages et fumée réduisent également la radiation totale, et par conséquent la radiation UV (source : Ashton 1974).

Nom		Gamme de longueur d'onde
Rayons Gamma		0.01 – 1 Å
Rayons X		1 – 100 Å
Ultraviolet	UV extrême	10 – 100 nm
	UV éloigné	100 – 200 nm
	UV moyen	200 – 300 nm
	UV proche	300 – 400 nm
Lumière visible		400 – 770 nm
Infrarouge	IR proche	770 – 2500 nm
	IR moyen	2.5 – 30 μm
	IR éloigné	30 – 300 μm
Ondes hertziennes	Micro-ondes	0.3 – 100 mm
	Radio et télévision	0.1 – 1000 m

TAB. 5.11 – Division du spectre électromagnétique (source : Ashton, 1974, tableau 1)

Sans l'affaiblissement considérable des UVs dû à tous ces facteurs aucune liaison organique ne pourrait exister durablement sur terre. Ceci est valable pour les matériaux organiques mais également pour toute forme de vie.

Malgré ce rôle protecteur de l'atmosphère, la partie des UV arrivant sur la surface terrestre provoque des dégradations sur les matériaux organiques tel que :

- les bois
- les matières plastiques
- les peintures et enduits synthétiques
- les bitumineux
- les matériaux composites avec des liants synthétiques

La vitesse de dégradation dépend des caractéristiques du matériau mais aussi de l'intensité et de la durée d'exposition au rayonnement solaire.

Radiations visibles et infrarouges

Les radiations du spectre visible et infrarouge ($\lambda > 300\text{nm}$) n'ont par contre pas l'énergie nécessaire pour détruire les liaisons chimiques. Lorsqu'elles sont absorbées, par n'importe quel matériau, elles provoquent avant tout une augmentation de la température. Cette dernière est à l'origine d'autres phénomènes d'altération ou de dégradation comme par exemple le ramollissement, l'allongement, le changement de phase, l'augmentation de la vitesse de réactions chimiques etc.

Les matériaux sensibles au réchauffement sont :

- les bitumineux.
- les thermoplastiques.

La vitesse de dégradation dépend de la température la plus haute pouvant être atteinte. Cette température varie en fonction de la composition de l'élément de construction ainsi que des capacités thermiques des couches proches de la surface. Elle dépend également de la quantité maximale d'énergie solaire pouvant atteindre la surface ainsi que de la température ambiante.

Pour simuler la lumière solaire et effectuer un vieillissement accéléré, différentes normes proposent des installations dans lesquelles l'éclairage se fait avec des lampes à rayons UV. L'essai n°10 *Intempéries artificielles* décrit dans la recommandation SIA V280 en est un exemple. Ici les contraintes atmosphériques chaleur, pluie et rayonnement UV sont simulées simultanément.

Dans le modèle, ces sollicitations de rayonnement énergétique sont regroupées dans la contrainte *Lumière-Soleil*. Elle est proportionnelle à l'énergie lumineuse reçue dans un laps de temps. Cette énergie comprend le rayonnement global c.-à-d. la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Elle dépend de données météorologiques, de la course solaire ainsi que de l'*orientation* et de l'*inclinaison* de l'élément de construction.

Les données d'ensoleillement météorologiques (rayonnement direct et indirect) sont depuis quelque temps largement diffusées, car elles sont nécessaires pour dimensionner des installations de production d'électricité avec des panneaux photovoltaïques. On les obtient pour différents lieux et avec diverses durées d'intervalles (journalier [$\frac{kWh}{m^2 \cdot jour}$], mensuel [$\frac{kWh}{m^2 \cdot mois}$] ou annuel [$\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$])

La figure 5.17 montre sur une carte ce type de données pour la Suisse.

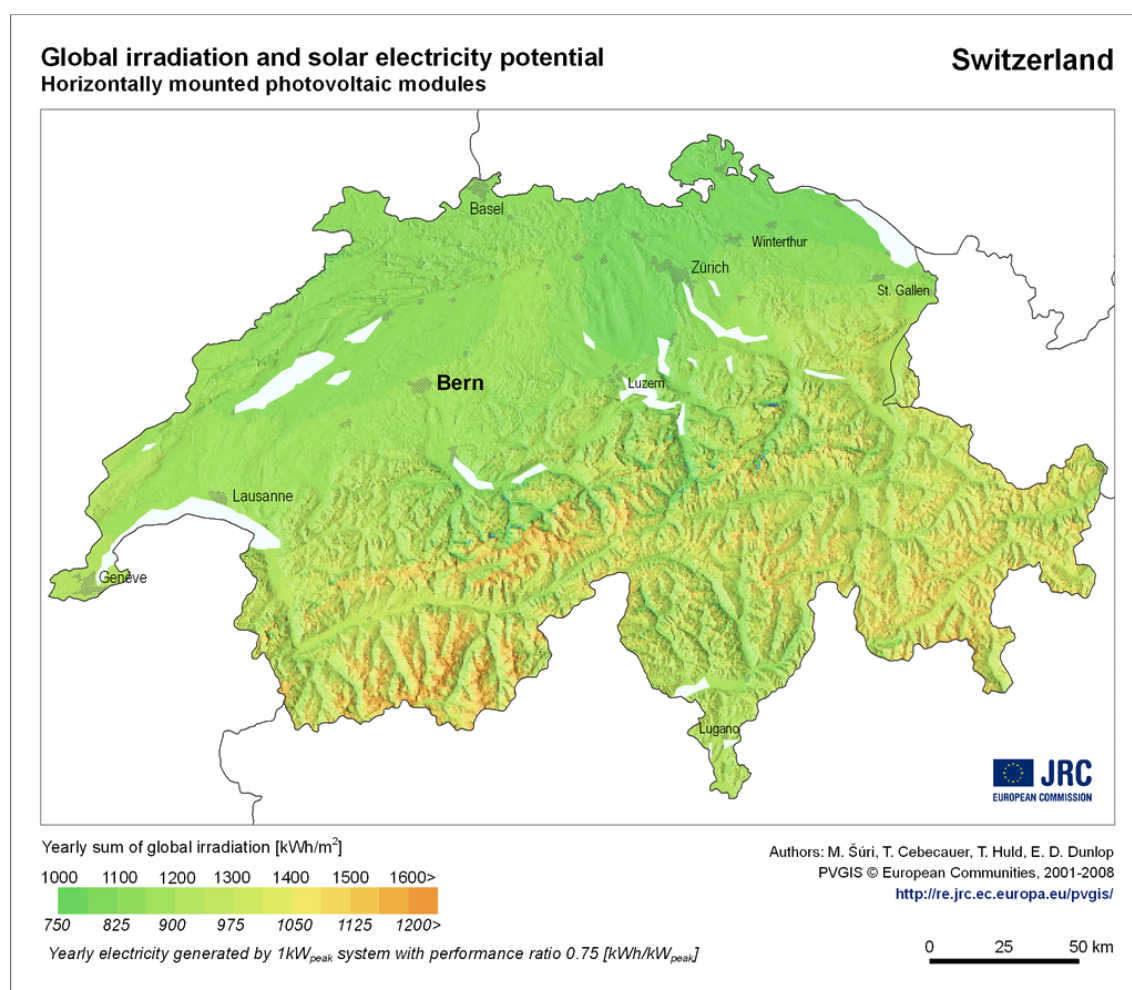


FIG. 5.17 – Carte suisse de l'irradiation globale pour un plan horizontal
(source : re.jrc.ec.europa.eu/pvgis)

Pour adapter ses données "brutes" à des éléments avec une orientation et une inclinaison, on peut également avoir recours à des outils de simulation développés pour le dimensionnement des installations photovoltaïques. La figure 5.18 montre un calcul fait avec un outil en-linge de la communauté européenne ¹¹ qui extrait les données d'un lieu à partir d'un système d'information géographique (SIG) pour des installations photovoltaïques (PVGIS) et convertit les données pour un azimut et une inclinaison donné.

¹¹Tiré de : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php>, consulté en juillet 2009

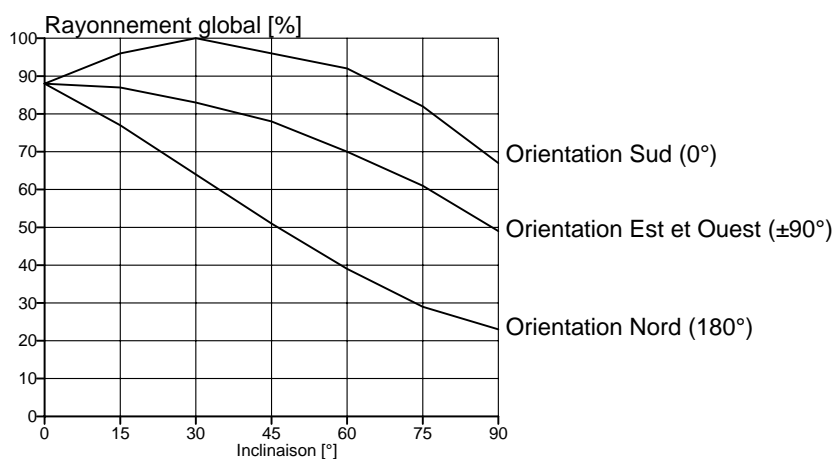


FIG. 5.18 – Rayonnement global annuel atteignant une surface en fonction de son inclinaison et de son orientation (100% = $1300 [\frac{kWh}{m^2 \cdot a}]$), latitude 48°

Niveau	Taux	Energie [$\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$]	Éléments significatifs
0	0%	0	Absence de lumière
1	10%	130	
2	20%	260	Lumière diffuse uniquement
3	30%	390	Façade verticale nord
4	40%	420	
5	50%	650	Façade verticale est et ouest
6	60%	780	
7	70%	910	Façade verticale sud
8	80%	1040	
9	90%	1170	Toiture horizontale
10	100%	1300	Toiture sud incl. 30°

TAB. 5.12 – Niveaux de la contrainte *Lumière*

Echelle

Pour le modèle de vieillissement, l'échelle de la contrainte *Lumière-Soleil* choisie est une échelle linéaire attribuant l'intensité maximale de $1300 [\frac{kWh}{m^2 \cdot a}]$ à la valeur 10 (voir tableau 5.12).

La contrainte *Lumière-Soleil* est également utilisée pour calculer les dégradations dues au rayonnement ultraviolet.

Initialisation

Le calcul du niveau de contrainte *Lumière* dans un milieu extérieur se fait selon la procédure indiquée dans la figure 5.19. Cette valeur est déterminée d'après la pente de l'élément et l'orientation de l'élément. Pour des milieux interrés ou immergés, le niveau est nul.

Procédure Init Lumière Ext						
IF NOT Plafond						
THEN					ELSE	
Lum:=1					Result:=2	
CASE Pente OF						
0	15	30	45	90		
Lum:=Lum * 10	Lum:=Lum * 9.5	Lum:=Lum * 9	Lum:=Lum * 2	Lum:=Lum * 1.5		
IF NOT(Enterré OR Immergé)						
THEN		ELSE				
Lum:=0		IF Pente>=45				
		THEN				ELSE
		CASE Orientation OF				
		W,N	E	S		
		Lum:=Lum * 2	Lum:=Lum * 3	Lum:=Lum * 4		
		IF Orientation<>N AND Protection solaire				
THEN		ELSE				
Lum:=Lum * 0.5						

FIG. 5.19 – Règles pour déterminer la contrainte *Lumière* d'un milieu extérieur

Pour les milieux intérieurs, les règles de détermination du niveau de contrainte sont données dans la figure 5.20. Cet algorithme s'applique à des locaux avec un éclairage naturel, c'est pourquoi les règles sont reprises de celles des milieux extérieurs.

Procédure Init Lumière Int					
IF NOT Plafond					ELSE
THEN					Result:=2
Lum:=1					
CASE Pente OF					
0	15	30	45	90	
Lum:=Lum * 10	Lum:=Lum * 9.5	Lum:=Lum * 9	Lum:=Lum * 2	Lum:=Lum * 1.5	

FIG. 5.20 – Règles pour déterminer la contrainte *Lumière* d'un milieu intérieur

5.8 Température et vapeur d'eau

Les contraintes hygrométriques *Température* et *Humidité relative* ont été introduites pour détecter des problèmes de condensation dans l'élément de construction lorsque les valeurs d'isolation thermiques sont altérées en cours de vieillissement. Elles sont exprimées dans leurs unités physiques en [°C] respectivement en [%]. Les valeurs utilisées sont des valeurs correspondantes à la période la plus froide de l'année.

Les contraintes à l'intérieur des couches sont calculées selon les lois de la physique du bâtiment.

Température extérieure

La contrainte *Température* des milieux extérieurs équivaut à la température la plus basse étant atteint pendant plusieurs jours consécutifs, en général pendant les mois de décembre à février. C'est une moyenne journalière. Le choix de cette période se justifie d'une part parce que le risque de condensation y est plus important ; d'autre part cela permet d'utiliser la température pour estimer un risque de gel.

Les données peuvent être extraites de bases de données météorologiques. Pour la Suisse, la norme SIA 180, à partir de la base de donnée *Meteonorm*¹², indique les températures moyennes mensuelles ainsi que la température hivernale de référence¹³ pour une centaine de stations.

Le graphique montre les températures hivernales de référence (θ_{minref}) ainsi que la température moyenne du mois de janvier ($\theta_{moyjan.}$) en fonction de l'altitude.

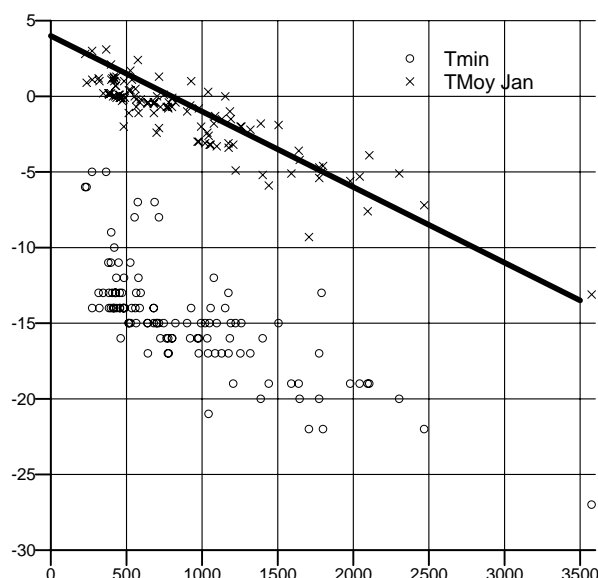


FIG. 5.21 – Distribution des températures en fonction de l'altitude d'après SIA180 :1999, tab. 11

En Suisse, pour extrapoler les températures à d'autres lieux, non mentionnés dans la norme, il est préconisé d'appliquer un gradient de température de -0.5°C par 100m d'altitude par rapport à la station la plus proche.

¹²*Meteonorm* est une base de données avec diverses valeurs météorologiques normalisées. Ces données permettent d'effectuer des simulations dans le domaine de bâtiments avec des valeurs normalisées (www.meteonorm.com).

¹³La température hivernale de référence est une valeur moyenne journalière qui n'est atteinte pendant trois jours consécutifs qu'une fois tous les vingt ans (SIA 180, 1999, Annexe A.1). Cette valeur de référence est utilisée pour le dimensionnement de systèmes de chauffage et constitue une valeur exceptionnelle.

D'après ces données, une fonction simplifiée est appliquée pour estimer la température extérieure d'un lieu en Suisse d'après son altitude :

$$\theta_{ext}(z) = 4^{\circ}\text{C} - 0.5^{\circ}\text{C} \cdot \frac{z}{100\text{m}} \quad (5.4)$$

avec

θ_{ext} : Température extérieure en [$^{\circ}\text{C}$]

z : altitude du lieu en [m]

Humidité relative extérieure

Pour le calcul de l'humidité relative φ , on peut se référer à la méthode de METEONORM '95 citée dans la norme SIA 180¹⁴.

$$\varphi(z) = \varphi_0 + b \cdot z \quad (5.5)$$

avec

φ_0 humidité relative à altitude 0 en [%]

b un gradient [%/km]

z l'altitude en [km]

	jan	fév	mars	avril	may	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	dec.
$z < z_{lim} \quad \varphi_0$	84.5	79.6	72.0	67.7	68.1	68.4	67.2	69.5	76.0	83.2	85.8	86.8
b	-9.5	-4.9	0.0	4.5	4.7	4.8	3.5	2.6	0.0	-6.0	-8.9	-11.0
z_{lim}	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	2.9	2.6	2.5	2.2	2.5	2.4	2.4
$z > z_{lim} \quad \varphi_0$	62.0	68.0	74.0	88.9	87.1	82.0	76.0	86.5	86.7	68.0	64.0	60.0
b	0.0	0.0	0.0	-3.7	-2.2	0.0	0.0	-4.1	-5.1	0.0	0.0	0.0

TAB. 5.13 – Humidité relative à altitude 0 et gradient pour les mois (source : SIA180 :1999, tab. 10).

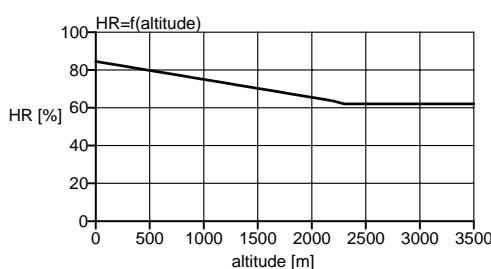


FIG. 5.22 – Evolution de l'humidité relative HR en fonction de l'altitude au mois de janvier (source des données : SIA180, tab. 10)

Température intérieure

Pour des milieux intérieurs chauffés, la température en hiver est en général constante et dépend de l'occupation.

Le tableau 4 de la norme SIA380/1 :2001, donne des indications concernant les températures intérieures à utiliser dans le cadre de l'établissement d'un bilan thermique. Il s'agit de *conditions normales d'utilisation* de différentes catégories d'ouvrages, c.-à-d. des moyennes pour la période de chauffage.

¹⁴Norme SIA 180 (1999), paragraphe A.1.2 Humidité mensuelle moyenne

Catégorie d'ouvrages		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
		Habitat collectif	Habitat individuel	Administration	Ecoles	Commerces	Restauration	Lieux de rassemblement	Hôpitaux	Industrie	Dépôts	Installations sportives	Piscines couvertes
Température intérieure	[°C]	20	20	20	20	20	20	20	22	18	18	18	28

TAB. 5.14 – Conditions normales d'utilisation : Température intérieure
(source :SIA380/1, tab. 4)

Initialisation

Dans la modélisation du vieillissement de parois, toutes sortes de milieux doivent pouvoir être utilisés. Pour cette raison un algorithme propre, représenté en figure 5.23, a été mis au point afin d'aider l'utilisateur à déterminer la température ambiante d'un milieu intérieur en fonction de ces caractéristiques. Ainsi, la température des milieux occupés est adaptée à la façon dont les personnes sont habillées. Pour les milieux non occupés, elle tient compte de la présence d'un chauffage. Dans les deux cas elle est légèrement réduite s'il y a présence de courants d'air.

Procédure Init Temp intérieure				
IF Temps occupation>Nul				
THEN			ELSE	
CASE Vêture	OF		IF Chauffage	
Désvêtus	Survêtus	ELSE	THEN	ELSE
Temp:=25°C	Temp:=18°C	Temp:=20°C	Temp:=16°C	Temp:=10°C
IF Courant d'air				
THEN			ELSE	
Temp:=Temp * 0.8				

FIG. 5.23 – Règles pour déterminer la température d'un milieu intérieur

On peut constater que les températures de locaux non occupés sont de deux degrés inférieurs aux conditions normales d'utilisation de la norme SIA 380/1. Ceci, parce que, comme pour les milieux extérieurs, la température intérieure doit correspondre à celle de la période la plus froide de l'année. Dans les milieux occupés, la distinction par la façon de se vêtir permet de tenir compte de plusieurs situations dans un même bâtiment.

Humidité intérieure

Dans les milieux intérieurs, la quantité de vapeur d'eau dans l'air dépend à la fois de la quantité de vapeur introduite par l'utilisation des locaux ainsi que de la quantité de vapeur extraite. Les êtres humains, par leur respiration et l'évapotranspiration sont souvent les principaux producteurs de vapeur. L'utilisation d'eau pour la cuisson ou des douches et bains sont également responsables d'un apport d'humidité. L'évacuation se fait principalement par des échanges d'air, soit par une aération naturelle, soit à l'aide d'une ventilation mécanique.

Dans le modèle, comme couramment dans la physique du bâtiment, la quantité de vapeur contenu dans l'air est exprimée par l'*humidité relative* (HR). Pour déterminer cette grandeur, il faut également tenir compte de la température de l'air.

Procédure HR intérieure		
HR20:=40%		
CASE Temps d'occupation OF		
Fréquent	Moyen	Occasionnel
HR20:=HR20 * 1.6	HR20:=HR20 * 1.4	HR20:=HR20 * 1.2
IF Temps d'occupation>Nul		
THEN		ELSE
CASE Taux d'occupation OF		
Fort		
HR20:=HR20 * 1.3		
CASE Vêture OF		
Survêtus	Dévetus	
HR20:=HR20 * 0.8	HR20:=HR20 * 1.2	
IF Amenée d'eau		
THEN		ELSE
HR20:=HR20 * 1.2		
IF Humidité		
THEN		ELSE
HR20:=HR20 * 1.4		
IF Aération		
THEN		ELSE
HR20:=HR20 * 0.7		
IF Courant d'air		
THEN		ELSE
HR20:=HR20 * 0.9		
HR:=HR20 To HR(HR20,Température)		

FIG. 5.24 – Règles pour déterminer l'humidité relative (HR) dans un milieu intérieur

Initialisation

La figure 5.24 montre les règles utilisées pour déterminer l'humidité relative (HR) à partir des différentes caractéristiques du milieu intérieur. Ainsi l'algorithme tient compte de la durée d'occupation, du taux d'occupation, de la présence d'eau ainsi que de la présence d'une aération ou de courants d'air. Les coefficients s'appliquent pour une température de l'air de 20°C, c'est pourquoi l'humidité est adaptée à la température effective, à la dernière ligne.

5.9 Pression CO_2

La contrainte *Pression CO_2* est introduite pour simuler les phénomènes de carbonatation de matériaux hydrauliques. Elle est représentée par la valeur réelle de la concentration de CO_2 dans l'air. Dans l'atmosphère cette concentration est de $0.6 [g/m^3]$.

A l'instar de la température et de la vapeur d'eau, la concentration de CO_2 dans les couches résulte d'un équilibre entre les conditions extérieures et les caractéristiques des couches. Pour la *Pression CO_2* , cet équilibre dépend de la perméabilité au CO_2 et du taux de carbonatation des couches. (voir chapitre B *Carbonatation*)

5.10 Valeur-pH

La contrainte *Valeur-pH* représente le Potentiel Hydrogène de l'environnement, soit son degré d'acidité ou alcalinité. Une partie des altérations chimiques est favorisée par un environnement acide ou alcalin. La dégradation la plus importante est la corrosion des métaux dont la vitesse est fortement dépendante de la valeur-pH du milieu environnant.

Elle est utilisée pour simuler les phénomènes de carbonatation des matériaux hydrauliques ainsi que dans la corrosion des métaux. Elle est exprimée dans l'échelle de la valeur-pH

Valeur	Dénomination	Exemples
0-3	Solution fortement acide	Vinaigre pur
4-6	Solution légèrement acide	Peau humaine
7	Solution neutre	Eau pure
8-10	Solution légèrement basique	Bétons non carbonatés
11-14	Solution fortement basique	Eau de javel pure

TAB. 5.15 – Echelle du pH

5.11 Gel

Des matériaux minéraux poreux tels que les pierres, les terres cuites, les bétons etc. vont également se dégrader sous l'action de cycles gel-dégel lorsque certaines conditions de température et d'humidité sont réunies.

En cas de présence d'humidité à la surface du matériau poreux, l'eau peut pénétrer à l'intérieur de la matière et remplir les pores. En contrepartie, des périodes sèches ou des courants d'air favorisent l'évaporation de cette eau et l'assèchement du matériau. Le risque de dégradation apparaît lorsque la teneur en eau est importante et que la température descend en dessous de 0°C. Le gel de l'eau emprisonnée dans les pores et l'augmentation du volume qui en résulte exerce des pressions internes sur la structure du matériau qui peuvent provoquer la dé-cohésion et l'éclatement. Selon Blaich (1999) ce risque d'éclatement existe lorsque la teneur en eau du matériau dépasse les 80% .¹⁵

Pour exprimer le risque de dégradation dû à l'action de cycles gel-dégel dans le modèle, la contrainte *Gel* a été introduite. C'est une contrainte qui est mise à jour à chaque cycle car elle est dépendante d'autres contraintes, soit :

- de la contrainte *Mouillage* qui définit la présence d'eau,
- de la contrainte *Vitesse d'air* pour déterminer dans quelle mesure le risque de mouillage peut être diminué par l'évaporation et
- de la contrainte *Température* pour déterminer si l'eau peut se transformer en glace.

Dans le modèle actuel elle est activée si les conditions suivantes sont réunies :

- la température est inférieure à -5°C.
- la contrainte *Mouillage* est supérieure à la contrainte *Courants d'air*, dans le cas contraire on considère que l'arrivée d'eau peut sécher à mesure et la teneur en eau du matériau n'est pas assez importante pour risquer des éclatements.
- la contrainte *Mouillage* est supérieure à la valeur 5. Le risque de gel apparaît lorsqu'il y a présence d'eau et que la température de la couche descend en dessous de 0°C pendant une certaine période.

Lorsque ces conditions sont remplies, le niveau de la contrainte *Gel* est déterminé selon la relation suivante :

$$C_{gel} = C_{mouillage} - 5 - 0.5 \cdot Temp \quad (5.6)$$

Les diagrammes 5.25 et 5.26 de la page suivante illustrent cette relation.

¹⁵Selon Blaich (1999), p.71 : Façades en maçonnerie de parement, Briques terres cuites et silico-calcaire : "On doit s'attendre à ce qu'une maçonnerie de parement en briques terre cuite ou en briques silico-calcaire soit endommagée par le gel dès que la teneur en eau de ces briques dépasse 80% de leur taux de saturation. Ce risque a le plus souvent pour origine une erreur de conception ou une faute d'exécution, ou encore l'une et l'autre."

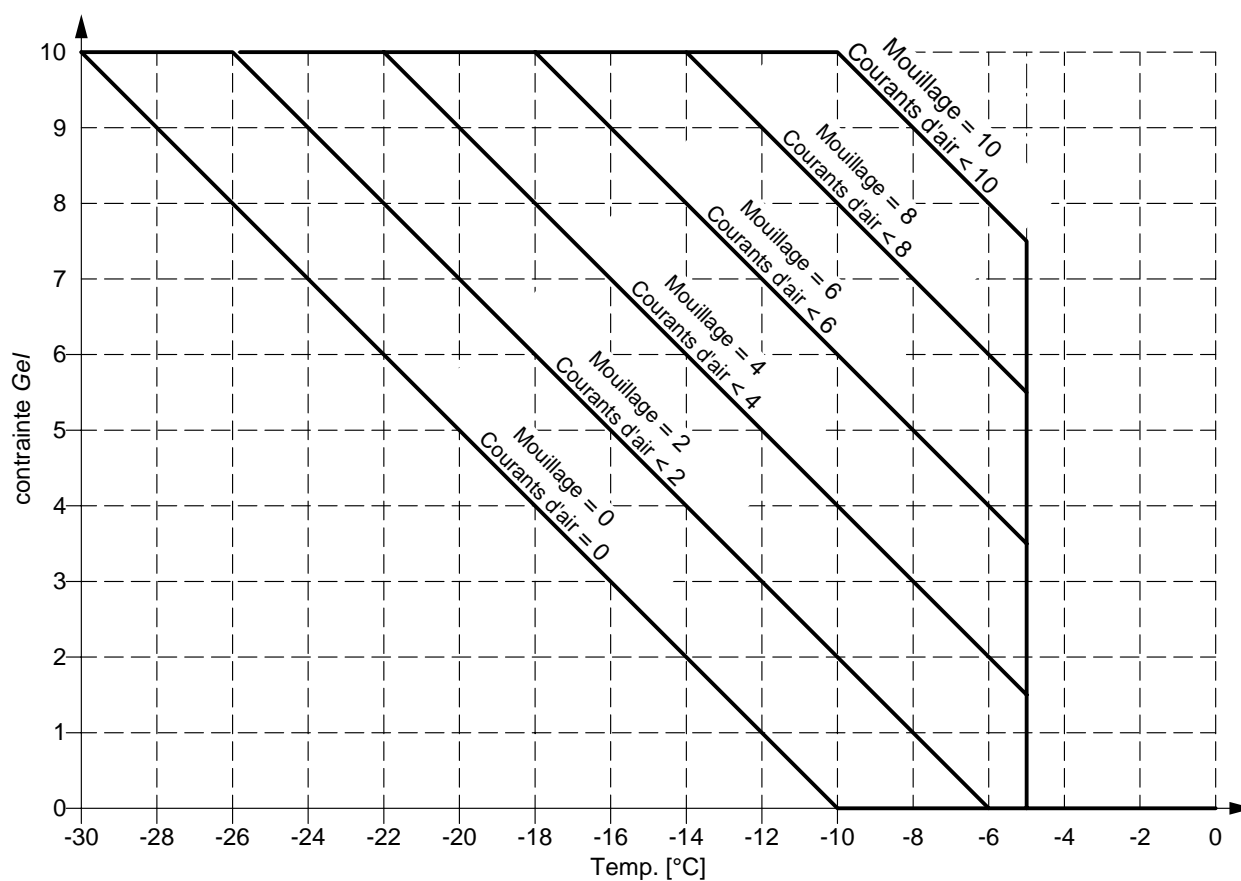


FIG. 5.25 – Détermination de la contrainte *Gel* à partir des contraintes *Mouillage*, *Courants d'air* et *Température*

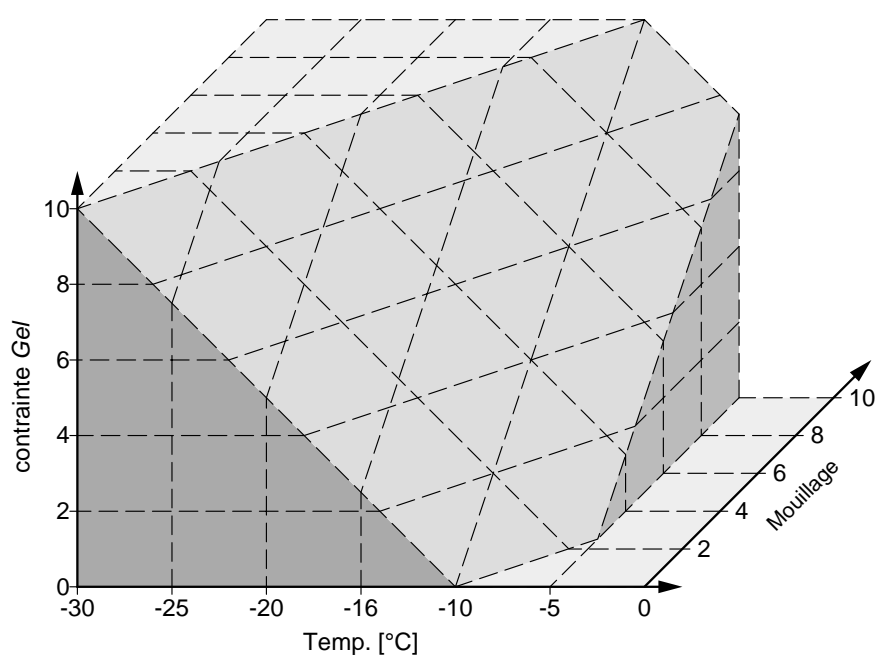


FIG. 5.26 – Gel3D

5.12 Pourriture

De manière générale, *”pour pouvoir se développer, les organismes vivants ont tous besoin de nourriture, d’une température appropriée et d’eau”* (Graf 1995). Ceci est également valable pour les microorganismes et champignons responsables de la pourriture.

Le risque de formation de pourriture dépend donc du type de matériaux, ainsi que de deux conditions extérieures soit : une température appropriée et la présence d’eau.

Matériaux

Les matériaux exposés au risque de pourriture sont les matériaux à base de cellulose tel que les bois, les cartons, papiers krafts etc. Ceci car ils fournissent un substrat idéal pour le développement de ces champignons.

Température

Selon Graf (1995), les champignons s’attaquant au bois peuvent exister lorsque la température se situe entre -2°C et 50°C . La plage qui favorise au mieux leur prolifération se trouve entre 20°C et 30°C . Ceci correspond à des températures que l’on retrouve presque toujours dans les constructions, à quelques exceptions près. C’est pourquoi on peut considérer que cette condition est toujours remplie.

Présence d’eau

Toujours selon Graf, *”Les champignons destructeurs du bois ne se développent qu’à partir d’un taux d’humidité ¹⁶ supérieur à 20%, l’humidité optimale pour eux se situant au delà de 27%.”*

Durant une année et en fonction de sa situation, le taux d’humidité d’un matériau n’est pas constant mais soumis à des cycles de mouillage-séchage. Ainsi le développement des microorganismes et champignons n’est pas continu mais cyclique également.

Les conditions de mouillage étant déjà exprimées par la contrainte *Mouillage* et les conditions de séchage par la contrainte *Courants d’air*, la contrainte *Pourriture*, pour la simulation, a été définie à partir de ces deux contraintes selon la relation suivante :

$$C_{pourriture} = \max(0, C_{mouillage} - C_{courantd'air}) \quad (5.7)$$

La figure 5.27 illustre cette relation graphiquement.

¹⁶Le taux d’humidité d’un matériau est le rapport entre la quantité d’eau contenue à l’état libre et son poids à l’état sec. Il s’exprime en [%]

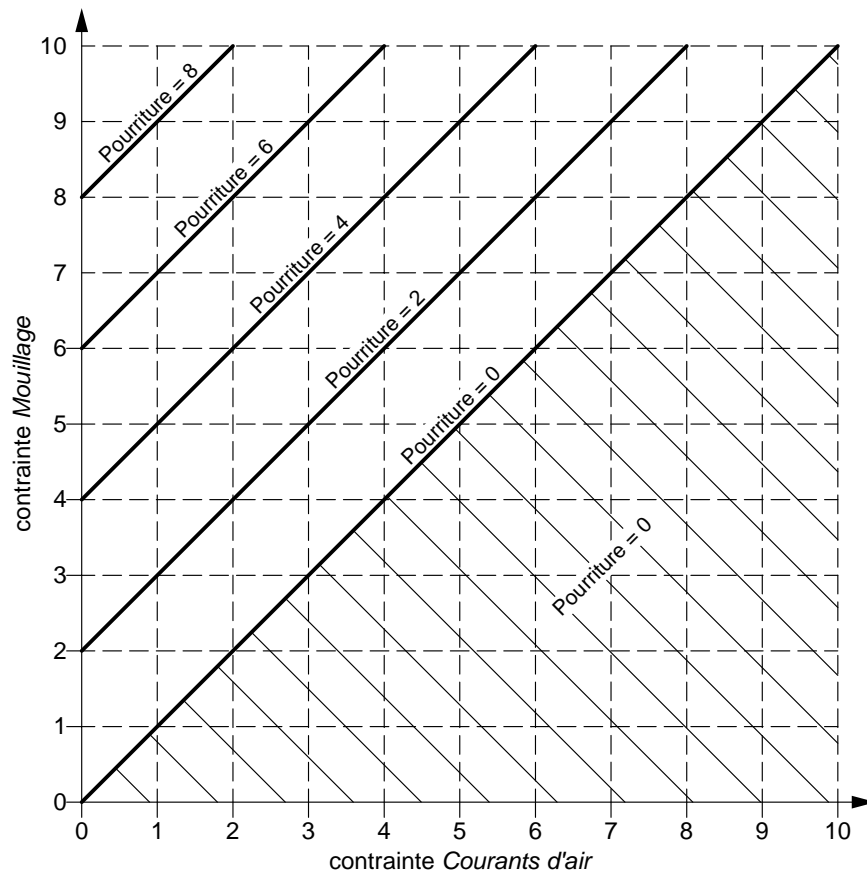


FIG. 5.27 – Contrainte *Pourriture* déterminée à partir des contraintes *Mouillage* et *Courants d'air*

Chapitre 6

Performances

Comme indiqué dans le chapitre 3 *Méthode*, l'aptitude au service d'un élément de construction dépend de ses performances. Les performances de l'élément dépendent eux-mêmes des performances des diverses couches dont il est composé.

Condition Rating	Condition/State Description	Damage
1	Excellent	0-10%
2	Very Good	11-25%
3	Good	26-40%
4	Fair	41-55%
5	Poor	56-70%
6	Very Poor	71-85%
7	Failed	>85%

TAB. 6.1 – Condition Assessment Scales (source :Zhang, 2005, Modified from Lounis et al. 1998)

Par *performance*, on entend généralement les caractéristiques ou propriétés d'un matériau donné, lui permettant de remplir certains fonctions attendues¹.

Dans les éléments de construction surfaciques, le rôle des performances des couches est double. D'une part elles déterminent les performances globales de l'élément, d'autre part, elles sont responsables de la façon dont les contraintes sont propagées à l'intérieur de ce dernier.

Ce chapitre présente plus en détail les *performances* utilisées pour la détermination de la durée de vie.

Certaines *performances* peuvent être mises en relation directe avec des caractéristiques techniques communément connues et utilisées dans d'autres applications et buts. Parmi cette catégorie on peut trouver les propriétés hygrothermiques tel que la conductibilité thermique (λ_{th}) ou la conductivité de vapeur d'eau (λ_{vap}) ainsi que les caractéristiques utilisées dans les calculs statiques tel que la résistance à la compression, à la traction ou l'allongement thermique (α_{th}).

D'autres *performances* dépendent de caractéristiques qui ne sont pas indiquées dans les fiches techniques ou qui sont exprimées dans des valeurs spécifiques. Ces dernières sont souvent directement liées à une façon de tester le matériau et employées uniquement dans un seul type de produits. Ceci rend difficile leur utilisation dans une application recouvrant une large palette de matériaux. Des exemples sont les valeurs issues de tests d'abrasion qui indiquent un nombre de tours effectués par l'appareil de test² ou la résistance au gel-dégel de

¹Dans le domaine de la durabilité et de la construction, la notion de performance exprime l'aptitude d'un bâtiment, d'un composant ou d'un matériau à pouvoir assurer un certain nombre de fonctions. Dans ce sens ce n'est pas une caractéristique ou une propriété mais plutôt un critère de qualité ou une faculté de pouvoir résister à une sollicitation. Toutefois les performances sont étroitement liées aux propriétés car les performances d'un matériau, d'un composant ou d'un bâtiment entier sont "assurées" par ses propriétés. C'est pourquoi la notion *performances* est aussi couramment utilisée pour désigner les *propriétés*.

²Détermination de la résistance à l'abrasion des étoffes par la méthode Martindale (ISO 12947 :1998)

bétons exprimée par un facteur de résistance déterminé à partir d'essais de 200 cycles de gel-dégel (Dobro-lubov, G. et Romer, A., 1977).

Pour ces cas, il a été nécessaire d'exprimer la performance par une valeur numérique pouvant être manipulée par les algorithmes de calcul. Pour ce faire, les diverses performances ont été exprimées par des niveaux compris entre 0 et 10, 0 signifiant aucune performance et 10 étant la valeur maximale.

Pour simuler la dégradation d'un matériau ainsi que pour déterminer comment il propage les contraintes, d'autres caractéristiques doivent également être prises en compte. La difficulté réside dans le fait que, pour ce type de caractéristiques, les valeurs ne sont pas facilement disponibles ou elles ne sont que difficilement mesurables comme p.ex. l'aspect de la surface d'un matériau.

Ainsi, par exemple, la résistance à l'usure des matériaux durs tel que l'acier ou le béton, n'est jamais mentionnée dans les caractéristiques. Pour d'autres matériaux tel que des textiles utilisés comme revêtement de sol, cette valeur est mesurée selon une méthode normalisée (ISO 5470-2) et indiquée dans les données techniques.

Etant donné que les divers matériaux n'ont pas tous les mêmes caractéristiques qui interviennent dans les phénomènes de vieillissement, un certain nombre de *performances de base*, commun à tous les matériaux, a été défini. D'autres *performances spécifiques* à un matériau ou à un groupe de matériaux tel que p.ex. le taux de carbonatation pour des matériaux hydrauliques ont été défini au cas par cas.

Dans la simulation, une performance peut avoir différents rôles :

- a) définir la propagation d'une contrainte
- b) être un critère de qualité définissant si la fin de durée de vie est atteinte
- c) définir la vitesse de dégradation d'une autre performance (p. ex. la *Résistance à l'usure* définit la vitesse de perte d'épaisseur pour une contrainte *Usure mécanique* donnée).

Les *performances de base* utilisées sont montrées dans le tableau 6.2 et décrites dans la suite de ce chapitre.

Performance	Echelle
Epaisseur	mm
Absorption de chocs	0...10
Résistance statique	0...10
Résistance à l'usure	0...10
Résistance au délavage	0...10
Résistance aux chocs	0...10
Résistance au poinçonnement	0...10
Résistance à la corrosion	0...10
Etanchéité à l'eau	0...10
Etanchéité à l'air	0...10
Etanchéité à la lumière	0...10
Résistivité thermique	$\frac{mK}{W}$
Résistivité à la diffusion de vapeur d'eau	$\frac{mg}{h \cdot m \cdot Pa}$
Etanchéité au CO ₂	$\frac{mm^2}{a}$
Aspect	0...10
Etat de surface	0...10
Valeur-pH (alcalinité)	pH

TAB. 6.2 – Performances de base utilisées dans tous les objets-matériaux

6.1 Épaisseur

La première performance commune à tous les matériaux est la performance *Épaisseur*. Elle exprime la largeur de la couche en millimètres [mm].

La performance épaisseur est généralement diminuée par des processus d'usure mécanique ou de délavage. Les phénomènes de défibrage (laines isolantes), de corrosion (métaux) ou de pourriture (ligneux) peuvent également provoquer des pertes de matière.

Dans certains cas, les valeurs d'autres performances dépendent de l'épaisseur de la couche. Pour pouvoir adapter ces grandeurs, chaque *objet-matériau* a également une *épaisseur de référence* associée. Ceci permet, à l'aide de cette dernière et d'une *performance initiale de référence*, de calculer la performance effective, adaptée à la largeur de couche.

Pour des matériaux filmogènes tel que les peintures ou matériaux d'étanchéités, l'épaisseur de référence correspond à l'épaisseur d'une couche de peinture ou d'une couche d'enduit. Dans l'interface utilisateur du logiciel, l'épaisseur des matériaux filmogènes est exprimée en nombre de couches.

6.2 Résistance à l'usure et au délavage

Les performances *Résistance à l'usure* et *Résistance au délavage* décrivent la faculté d'un matériau de résister à des sollicitations abrasives. Pour la simulation, elles sont les facteurs qui doivent permettre le calcul de perte de matière de la couche exposée en fonction des contraintes *Usure mécanique* et *Délavage* selon la relation suivante :

$$V_{usure} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = f(C_{Usure\ Meca.}, P_{Res.\ Usure}) \quad (6.1)$$

$$V_{délav.} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = f(C_{Délav.}, P_{Res.\ Délav.}) \quad (6.2)$$

avec :

$V_{usure}, \frac{\Delta E}{\Delta t}$: Variation d'épaisseur par abrasion en [mm/a]
 $C_{Usure\ Meca.}$: Niveau de contrainte *Usure Mécanique*
 $P_{Res.\ Usure}$: Niveau de performance *Résistance à l'usure*

De manière similaire aux variations de performances tel nous les avons présentées au chapitre 4.2.3, la variation de l'épaisseur par usure mécanique est calculé selon la relation suivante :

$$V_{usure} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \left(\frac{C_{Usure\ Meca.}}{10} \right)^2 \cdot V_{usure,max} \quad (6.3)$$

avec :

$C_{Usure\ Meca.}$: Niveau de contrainte *Usure Mécanique*
 $V_{usure,max}$: Variation d'épaisseur pour un niveau de contrainte *Usure mécanique* =10 (maximal) en [mm/a]

Le facteur $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ est la caractéristique de la couche définissant la perte d'épaisseur pour une contrainte maximale, c.à.d. la

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = 0.5^{P_{Usure\ M}} \quad (6.4)$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{10} \cdot 0.5^{P_{Délavage}} \quad (6.5)$$

Etant donné que l'abrasion est un processus qui s'opère à la surface des couches, il est nécessaire de différencier le phénomène entre la face A et la face B pour certains matériaux dont la résistance à l'usure peut varier au cours du temps.

La résistance à l'usure peut être atteinte par plusieurs phénomènes de dégradation :

Les matériaux minéraux poreux sont sensibles au cycle gel-dégel qui fragilise la surface.

La dépolymérisation des matériaux organiques soumis aux UV diminue également la résistance aux effets abrasifs.

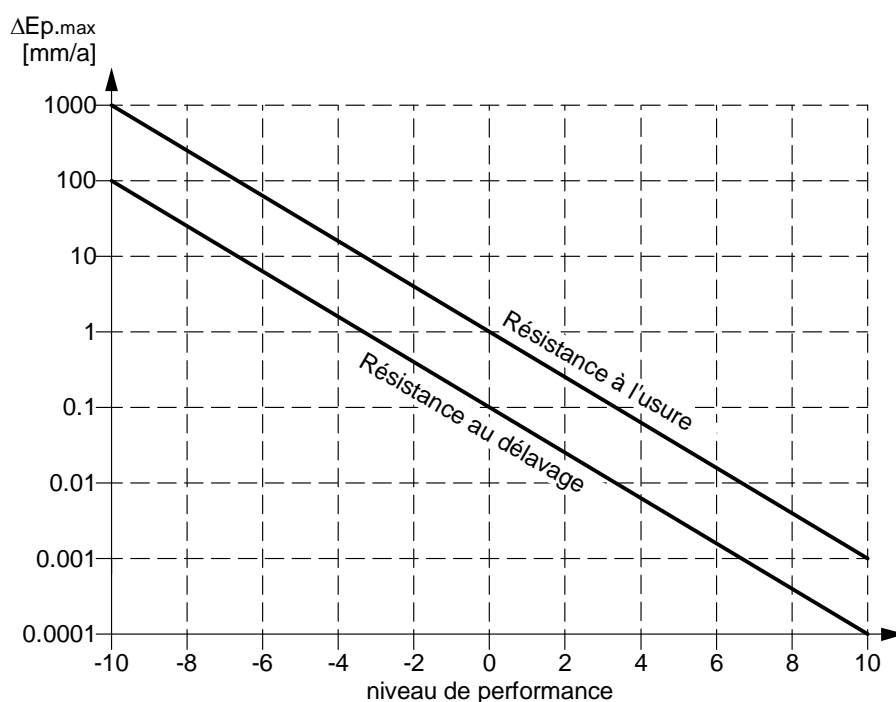


FIG. 6.1 – Relation entre les niveaux de performance et la perte d'épaisseur
Niveaux des contraintes *Usure mécanique* resp. *Dé lavage* = 10

Organisation	Norme	Année	Matériaux	Méthode
ISO	5470-1	1999	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique	Appareil d'essai d'abrasion Taber
ISO	7784-1	1997	Peintures et vernis	Méthode utilisant une roue revêtue de papier abrasif
ISO	12947-1	1998	Textiles	méthode Martindale
ISO	23337	2007	Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique	machine de Lambourn perfectionnée
ISO	24338	2006	Revêtements de sol stratifiés	Taber
ISO	10545-7	1996	Carreaux et dalles céramiques	

TAB. 6.3 – Normes déterminant la résistance à l'abrasion

6.3 Résistance statique

Comme déjà mentionné dans le chapitre 3.8, la plupart des éléments de construction doivent avoir une certaine stabilité structurelle afin d'éviter leur propre effondrement ainsi que celui d'autres parties du bâtiment. D'autre part, on peut constater que dans une construction multicouche, certaines couches sont porteuses, c.-à.-d. qu'elles ont un rôle structurel, alors que d'autres sont portées. Pour rester en place, les couches de cette deuxième catégorie sont "accrochées" à des couches "support" de la première catégorie, ceci par fixation mécanique ou par collage.

Pour déterminer la stabilité structurelle de l'ensemble et pour vérifier les relations entre couches *portées* et couches *porteuses*, la performance *Résistance statique* a été introduite. Cette performance est caractérisée par des niveaux allant de 0 à 10. Le tableau 6.4 montre la correspondance entre les niveaux et les différents types de couches ou matériaux. La colonne *portée* indique approximativement la portée maximale pour supporter une charge de 200[kg/m²] en flexion.

Niveau	Portée	Éléments	Matériaux typiques
0	0.1mm	Vrac+filmogènes	Gravier, Papier, Glacis, Peintures, Air
1	3 mm	Couches filmogènes collées	Enduit synt. ou au plâtre
2	20 mm	Mosaïque	Crépi 30 mm
3	10 cm	Carreau de sol	Carreaux céramiques
4	40 cm	Dalette sur taquet	Bois mince
5	1 m	Dalette Ch. d'Oex	Brique de cloison
6	2 m	Dalle palier	Bois épais 40 mm
7	4 m	Dalle séjour	Terre c. pleine, Plots béton
8	8 m	Dalle entre façades	Béton armé
9	13 m	Structure faible portée	Structure BA, Acier, Bois
10	22 m	Structure grande portée	Structure béton armé et acier

TAB. 6.4 – Niveaux de la performance *Résistance statique*

Etant donnée que la *Résistance statique* dépend à la fois de la nature du matériau et de l'épaisseur de la couche, la valeur de cette performance suit également les variations d'épaisseur. Elle est mise à jour au début de la simulation ainsi qu'à chaque cycle de calcul. La résistance des couches minces collées, telles que des enduits, peintures ou autres revêtements de surface dépendent de la résistance de leurs couches support.

La relation entre épaisseur de la couche et niveau de *Résistance statique* est indiquée pour plusieurs matériaux dans l'annexe A.

6.4 Résistance aux chocs et au poinçonnement

Pour la simulation des dégradations de matériaux due à des impacts, il a été distingué entre la *Résistance au poinçonnement* et la *Résistance aux chocs*. Ceci correspond aux deux types d'impacts introduits dans les contraintes (voir paragraphe 5.3) : le *Poinçonnement* et les *Chocs*. La première décrivant la capacité de résister à des coups portés par des objets fins et pointus alors que la deuxième représente la faculté de résister à des impacts d'objets mous et lourds.

La performance *Résistance aux chocs* décrit la capacité d'une couche de subir des chocs sans que ces derniers entraînent des déformations majeures, des perforations, des fissures ou des cassures du matériau.

		Bois tendre	Bois dense	Verre plat, Céramique	Pierre tendre, Mortier, Terre Cuite	Pierre dense, Béton armé
niveau	Divers défauts	Ecrasement	Ecrasement	Casse	Casse	Casse
0		-	-	email 0.3	-	-
1	Papier	-	-	1	5	3
2	Carton PL	1	-	2	10	5
3	Mousse MP	2	1	4	20	10
4		3	2	6	30	20
5	Peint émail	5	3	10	40	30
6		10	5	20	50	40
7	Fibreux	20	10	30	70	50
8		40	20	40	100	60
9	Lino PVC	60	30	50	150	80
10	Caoutouc, Vrac, Air	100	50	60	200	100

Epaisseurs en [mm]

TAB. 6.5 – Niveaux de la performance *Résistance aux chocs*

Le comportement des couches filmogènes face aux impacts dépend également des caractéristiques de leurs couches supports. Ainsi une couche de peinture ne va pas réagir de la même façon si elle est appliquée sur du plâtre, du bois ou sur un crépi de mortier. Pour tenir compte de cette interdépendance, les performances *Résistance aux chocs* et *Résistance au poinçonnement* ont été introduites. Elles définissent le comportement d'une couche support lors d'un coup soit avec un objet gros et mou (choc) soit avec un objet pointu (poinçonnement).

Toujours d'après la norme ISO 7892, trois classes de sollicitations pour des façades avec isolation périphérique sont décrites.

Category	Description	Examples
A	Readily accessible to public and others with little incentive to exercise care. Prone to vandalism and abnormally rough use.	External walls of housing and public buildings in vandal-prone areas.
B	Readily accessible to public and others with little incentive to exercise care. Chances of accidents occurring and of misuse.	Walls adjacent to pedestrian thoroughfares or playing fields when not in category A
C	Accessible primarily to those with some incentive to exercise care. Some chance of accidents occurring and of misuse.	Walls adjacent to private open gardens. Back walls of balconies.
D	Only accessible, but not near a common route, to those with high incentive to exercise care. Small chance of accidents occurring and of misuse.	Walls adjacent to small fenced decorative gardens with no through-paths. A,B,C,D, all applicable to zone of wall up to 1.5m above pedestrian or floor level.
E	Above zone of normal impacts from people but liable to impacts from thrown or kicked objects.	1.5-6m above pedestrian or floor level at locations A and B.
F	Above zone of normal impacts from people and not liable to impacts from thrown or kicked objects.	Walls surfaces at higher positions than those defined in E.

TAB. 6.6 – Catégories de performances aux impacts pour murs selon la norme anglaise BS 8200 :1985 (source :Addleson et Rice 1991, Table T2.2/5 Impact performance categories for walls)

Classe	Description
I	Dans des lieux accessibles aux personnes sans sollicitation exagérée
II	Impacts de chocs avec des objets lancés ou frappés. Généralement en dessous de 5m de hauteur et en dessus du niveau du sol.
III	Une sollicitation par des chocs est peu probable. Généralement en dessus de 5m de hauteur sauf balcons.

TAB. 6.7 – Classes de sollicitations aux chocs selon la norme ISO 7892

Niveau	Sollicitation typique	Chute d'une bille de 50kg
0	Aucune	
1	Toucher	Traverse instantanément
2	Coup de poing	Traverse à terme
3	Marche	
4	Sauts rares	
5	Sauts fréquents	
6	Chute de billes (grêlons)	Marque diam. 10mm
7	Chute de vaisselle	Marque diam. 5mm
8	Chute de bouteilles	Marque diam. 2mm
9	Chute de marteau	Marque diam. 1mm
10	Chute de pièce de machines	Sans marque

FIG. 6.2 – Niveaux de la contrainte *Poinçonnement*

6.5 Absorbition des chocs

La performance *Absorption des chocs* a été introduite pour calculer la propagation de la contrainte *Chocs* à travers les diverses couches. Les *chocs*, contrairement à l'*usure mécanique* ou au *délavage*, n'agissent pas uniquement sur la surface du composant. En provoquant des déformations ou des perforations de la matière, ils peuvent très bien atteindre des couches inférieures et induire la détérioration de ces derniers.

La performance *Absorption des chocs* exprime donc une grandeur en relation avec la capacité d'atténuer les coups atteignant le composant. On peut observer deux principes permettant d'absorber les chocs.

Le premier phénomène concerne les matériaux fragiles ou cassants. Etant donné leur faible élasticité, ces matériaux réagissent de manière radicale. Soit ils absorbent le choc sans aucune déformation et répartissent l'énergie reçue sur les couches suivantes sous forme de compression, soit l'énergie reçue dépasse leur limite de rupture et ils cassent. Parmi les matériaux réagissant de cette façon, on peut énumérer les pierres, les bétons, les produits de terre cuite, les verres etc.

La deuxième catégorie comprend les matériaux ayant une certaine souplesse, ce qui leur permet de se déformer et d'absorber l'énergie du choc sans forcément se casser. Si la limite d'élasticité est franchie, la déformation est définitive, sinon elle est temporaire. Toutefois, ces matériaux peuvent également se fissurer ou être percés ; ceci lorsque leur limite de rupture est franchie. Parmi les matériaux déformables on peut citer les métaux, les thermoplastiques, les matériaux en vrac (sable, gravier), les bois etc.

Le niveau de performance *Absorption des chocs* d'une couche dépend de la résistance mécanique du matériau ainsi que de l'épaisseur de la couche.

Etant donné que la performance *Absorption des chocs* est utilisée pour calculer la propagation des contraintes *Chocs* et *Poinçonnement*, l'échelle des niveaux de performances a été faite en fonction des échelles de niveau de contrainte. Ainsi, lorsque le niveau de performance *Absorption des chocs* est plus grand que le niveau de contrainte *Chocs* ou *Poinçonnement*, rien n'est transmis. Dans le cas contraire, l'intensité propagée peut être calculée par simple soustraction comme décrit au point 4.2.2.

$$C_{chocs,i+1} = \max(C_{chocs,i} - P_{abs. chocs,i} , 0) \quad (6.6)$$

$$C_{poinçonnement,i+1} = \max(C_{poinçonnement,i} - P_{abs. chocs,i} , 0) \quad (6.7)$$

Le tableau 6.8 représente les différents niveaux d'*Absorption de chocs* d'après l'énergie de l'impact qui peut être absorbée sans subir de déformations permanentes. Les colonnes suivantes donnent quelques sollicitations typiques (voir aussi niveaux de contrainte *Chocs*, page 100) ainsi que quelques exemples de matériaux.

Niveau	Energie max. absorbée [J]	Sollicitation typique	Exemple de matériaux
0	0	Aucune	Couches minces tel que les peintures ou les traitements de surface
1	0.05	Toucher	
2	0.1	Coup de poing	Panneau de bois et de plâtre (ép.<5mm)
3	0.2	Marche	
4	0.5	Sauts rares	Panneau de bois et de plâtre (ép.5-10mm)
5	1.0	Sauts fréquents	
6	2.0	Chute de billes (grêlons)	
7	5.0	Chute de vaisselle	
8	10	Chute de bouteilles	
9	50	Chute de marteau	
10	100	Chute de pièce de machine	Bois et plâtre(ép.>20mm), couches d'air matériau fragiles : éléments de terre cuite et céramique, verre, bétons, pierres

TAB. 6.8 – Niveaux de la performance *Absorption de chocs*

6.6 Etanchéité à la lumière

La performance *Etanchéité à la lumière* ou *Transparence* permet d'exprimer la faculté d'une couche de "freiner" ou laisser passer la lumière du soleil.

Cette performance participe à la propagation de la lumière tout comme elle permet de déterminer la transparence globale du composant.

Etant donné que les performances représentent en principe la faculté d'empêcher la pénétration d'un agent à l'intérieur du composant multicouche, il a été décidé d'utiliser la valeur complémentaire au facteur de transparence τ , c.-à-d. l'*Etanchéité à la lumière*. La contrainte *Lumière* étant définie par un pourcentage de l'éclairement maximale (voir paragraphe 5.7) L'échelle de niveau de la performance *Etanchéité à la lumière* peut être défini à l'aide du facteur de transparence selon la relation suivante :

$$P_{\text{ét.lumière}} = 10 \cdot (1 - \tau) \quad (6.8)$$

La table 6.9 met les niveaux de performances en relation avec quelques éléments caractéristiques. On peut y voir que, les matériaux transparents ou translucides mis à part, certains matériaux, assemblés avec des joints ouverts ou bien des glacis laissent passer une certaine quantité de lumière. Ainsi, pour les matériaux opaques, montés en plaques, l'*Etanchéité à la lumière* dépend du système de montage, notamment de la nature des joints.

Niveau	Facteur de transmission lumineuse	Eléments caractéristiques
0	100%	
1	90%	Air
2	80%	Verre clair
3	70%	Matériaux translucides (pavés de verre)
4	60%	
5	50%	
6	40%	Verre absorbant
7	30%	
8	20%	Bardage ou carreau avec joints ouverts
9	10%	Glacis de protection des bois
10	0%	Matériaux opaques

TAB. 6.9 – Niveaux de la performance *Étanchéité à la lumière*

Comme pour la performance précédente, cette échelle permet de calculer la propagation de la contrainte *Lumière* par subtraction de la contrainte *Etanchéité à la lumière* :

$$C_{\text{lumière},i+1} = \max(C_{\text{lumière},i} - P_{\text{ét.lumière},i}, 0) \quad (6.9)$$

6.7 Etanchéité à l'eau

La performance *Étanchéité à l'eau* détermine la capacité d'une couche de retenir de l'eau infiltrée. Cette capacité est déterminée à la fois par les caractéristiques du matériau ainsi que par sa mise en oeuvre, c.-à.-d. les caractéristiques des raccords et joints.

La définition des niveaux de l'*Étanchéité à l'eau* a été faite par rapport à la définition de la contrainte *Mouillage*. Ainsi une couche avec une *Étanchéité à l'eau* de x est étanche à une contrainte de *Mouillage* de la même valeur x .

Niveau	Qualification	Char. matériaux	Éléments significatifs
0	Aucune résistance	Perméable	Humidité nulle
1	Étanche à une humidité occasionnelle		Mur sec
2	Étanche à une humidité régulière	Caverneux	Plafond de douche
3	Étanche à une humidité constante		Cave
4	Étanche à un mouillage occasionnel	Capillaire	Soubassement
5	Étanche à un mouillage régulier		Sol int. lavable, façade peu exposée
6	Étanche à l'eau par pluie battante	Poreux	Façade très exposée, murs c. terre
7	Étanche à l'eau ruisselante (h=1mm)	Étanche disjoint	Toit en pente
8	Étanche à l'eau stagnante (h=10mm)	Étanche et jointif	Toit plat, chéneau
9	Étanche à l'eau stagnante (h=2m)	Étanche résistant	Bassin, piscine
10	Étanche à l'eau sous pression (p>0.2bar, h>2m)		Haute pression, canalisation

TAB. 6.10 – Niveaux de la performance *Étanchéité à l'eau*

6.8 Etanchéité à l'air

La performance *Étanchéité à l'air* détermine de quelle façon la contrainte *Vitesse d'air* peut traverser une couche. Elle dépend d'une part de la perméabilité à l'air du matériau, d'autre part, elle est influencée par la mise en oeuvre de ce dernier. On devrait tenir compte de ce dernier aspect lorsqu'il s'agit de matériaux assemblés présentant des joints. Selon la nature et la dimension de ces joints, les passages d'air se feront alors principalement non pas à travers le matériau mais à travers ces vides plus ou moins perméables. Les *Étanchéités à l'air* des couches permettent également de déterminer l'*Étanchéité à l'air Globale* du composant.

Niveau	Qualification	Famille de matériaux
0	Complètement perméable	Couche d'air, lattage
1		Air, fibreux et textile léger, matériau en vrac
2	Très perméable	Fibreux et textile denses, tôle perforée
3	Bien perméable	
4	Perméable	Tuile de toiture
5	Peu perméable	
6	Peu étanche	Lambris et ligneux en général (joints)
7	Moyennement étanche	Parquet en bois dur
8	Très résistant	Maçonnerie
9	Étanche	Enduit ou peinture mince
10	Complètement étanche	Métaux, verre, enduits épais

TAB. 6.11 – Niveaux de la performance *Étanchéité à l'air*

6.9 Performances hygrothermiques

Comme décrit dans le chapitre propagation, la propagation de la chaleur et la diffusion de la vapeur d'eau sont calculées selon les lois de la physique du bâtiment. Pour le faire, les performances hygrométriques doivent être représentées par des grandeurs physiques. Pour maintenir la logique des autres performances et associer à la valeur 0 une propagation de la contrainte sans atténuation, il a été décidé d'exprimer les performances hygrométriques par des résistivités.

Ainsi, pour la conduction de la chaleur, la performance *Résistivité thermique* (ϱ_{th}) étant l'inverse de la conductivité thermique (λ_{th}) est utilisé pour les calcul des températures à l'intérieur du composant.

$$\text{Résistivité thermique } \varrho_{th} = \frac{1}{\lambda_{th}} \quad \text{en} \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right]$$

Les pressions partielles de la vapeur d'eau sont déterminées à l'aide de la performance *Résistivité de vapeur* (ϱ_{vap}) étant l'inverse de la conductivité de vapeur (λ_{vap})

$$\text{Résistivité de vapeur } \varrho_{vap} = \frac{1}{\lambda_{vap}} \quad \text{en} \quad \left[\frac{m \cdot h \cdot Pa}{mg} \right]$$

6.10 Diffusivité CO₂

Pour pouvoir tenir compte des phénomènes de carbonatation des matériaux à base de chaux hydraulique ainsi que des dégradations qui en découlent, la *Diffusivité au CO₂* de chaque couche doit être connue. Ceci permet de calculer la diffusion de CO₂ à travers les matériaux selon la méthode décrite au chapitre B *Carbonatation*.

A l'instar des performances hygrométriques, la caractéristique de diffusion au gaz carbonique est exprimée par la performance *Résistivité au CO₂* (ϱ_{CO_2}) étant l'inverse du *Coefficient de Diffusion* (D)

$$\text{Résistivité au CO}_2 \quad \varrho_{CO_2} = \frac{1}{D} \quad \text{en} \quad \left[\frac{a}{mm^2} \right] \text{ ou } \left[\frac{s}{mm^2} \right]$$

Klopfer (1978) présente quelques valeurs de la diffusion de CO₂ sous forme de *coefficient de résistance à la diffusion* (μ). En analogie avec la diffusion de vapeur d'eau, ce coefficient exprime combien de fois le matériau en question est plus étanche au CO₂ qu'une couche d'air de même épaisseur (voir tableau 6.12).

$$\text{Coefficient de résistance à la diffusion } \mu = \frac{D}{D_{air}}$$

Bezeichnung	Art des Stoffes	Dicke s (cm)	μ	$\mu \cdot s$ (cm)
Flamuco Wandfarbe	Innendispersion, Styrolacrylat	0,035	1 160	41
Loba Poro Fassadenfarbe	AuBendispersion, Acrylharzcopolymer	0,046	4 500	207
Icosit Betoncolor	Acrylharzlösung, pigmentiert	0,014	4 020 000	56 280
Icosit A 2030	Chlorkautschuk, pigmentiert	0,0075	69 700 000	522 800
Icosit Flüssigkunststoff 2630	Epoxiddispersion	0,041	247 000	10 130
Icosit K-24	Epoxidflüssigharz, lösemittelfrei	0,018	996 000	17 930
Béton B 35	W/Z = 0,5, PZ 25, 300 kg/m ³	1,00	358	358
Béton B 35, sillconisiert	Silicon, gelbste Siliconharze	1,00	267	267

TAB. 6.12 – Coefficients de diffusion de CO₂ pour différents matériaux
(source : Engelfried, 1977 cité dans Klopfer, 1978)

6.11 Aspect

Par l'introduction d'une performance *Aspect*, la simulation peut également tenir compte de critères esthétiques pour déterminer la fin de la durée de vie.

Les niveaux ont été définis depuis des aspects bruts pour des matériaux devant être recouverts jusqu'à des matériaux de finition luxueux

Niveau	Qualification	Familles de matériaux
0	Vrac	Sables, gravier, matériaux fortement dégradés
1	Fibreux	Laines isolantes
2	Tendres	Étanchéités
3	Tendres	Bitumineux, mousses isolantes
4	Caverneux	Maçonneries, bétons
5	Bruts	Acier brut,
6	Très rustiques	Enduits rugueux, terre cuite
7	Rustiques	Enduits
8	Fins	Pierres et bois tendres, linos
9	Nobles	Peintures, enduits lisses
10	Luxueux	Pierres et bois denses, verre, métaux polis

TAB. 6.13 – Niveaux de la performance *Aspect*

6.12 Etat de surface

La façon dont des polluants, poussières, ou autres agents salissants se déposent et adhèrent sur un matériau dépend avant tout de son état de surface. De manière générale, on peut affirmer que plus la surface est lisse, plus les divers agents peinent à se fixer dessus. Pour tenir compte de ces phénomènes de "dépôt de matière étrangère", la performance *État de surface* a été introduite dans la modélisation, désignant le caractère rugueux ou lisse de la surface du matériau. Etant donné qu'en cas de dégradation du matériau, la surface se modifie généralement d'un état lisse vers un état rugueux, le niveau maximal 10 a été attribué à des surfaces polies et parfaitement lisses. Ensuite, avec l'augmentation de la rugosité, le niveau de performance diminue graduellement pour atteindre la valeur nulle pour des matériaux liquides ou solides n'ayant pas de surface proprement dite.

Niveau	Surface	Matériaux typiques	Remarques
0	Liquide ou gaz	Air, Eau	
1	Incohérente	Fibreux, Gravier	Matériaux ne pouvant être crépis ou plâtrés
2	Caverneuse	Tufs, Bétons caverneux	
3	Caverneuse	Plots de ciment	Matériaux pouvant être crépis ou plâtrés
4	Poreuse	Crépis rustiques, Béton brut, Terre cuite brute	
5	Dressée	Crépis fins, Mortier, Béton préfabriqué, Terre cuite fine,	Matériaux pouvant recevoir un papier peint
6		Plâtre, Agglomérés bitumés	
7	Lisse à peindre	Enduit fin, Ribage	Matériaux pouvant être peints
8	Lisse à cirer	Bois et pierre tendre, Acier	
9	Microporeuse	Bois et pierre dense brute, Peinture mate	
10	Compacte	Pierre dense polie, Caoutchoucs, Autres métaux, Vernis, Verre	Matériaux ne nécessitant pas de revêtement

TAB. 6.14 – Niveaux de la performance *Etat de surface*

La figure 6.14 montre les niveaux de la performance *Etat de surface*. On y voit que la rugosité considérée peut aller d'un état incohérent, représentant beaucoup de cavité et ne permettant pas d'y accrocher une autre couche, jusqu'à des surfaces parfaitement lisses sans porosité.

Chapitre 7

Etudes de cas

Dans les pages suivantes, deux études de cas sont exposées pour présenter l'application de l'outil et pour illustrer les différentes formes de résultats que l'on peut obtenir. Ces derniers servent à la fois pour analyser la durabilité d'un élément mais aussi, dans une phase de mise au point des modèles, à la vérification des algorithmes et des paramètres. Cet aspect est important parce que la complexité des processus est telle que seuls des outils visuels, en forme d'animation ou de graphique, permettent de maîtriser toutes les interactions et la grande quantité de données.

Les diverses étapes décrites sont :

Configuration des objets

Pour configurer la modélisation, il est d'abord nécessaire de configurer l'objet-paroi. Pour ce faire, il faut définir les couches, choisir des milieux et introduire les données concernant l'exposition. Ces données sont à chaque fois résumées dans des tableaux.

Construction du modèle

Pour créer le modèle, l'outil assemble les différents objets selon la configuration. Cette étape est montrée dans le premier exemple.

Résultats des simulations

Les résultats des simulations (discrètes et stochastiques), sont présentés sous forme de courbes de performance et sous forme de liste d'événements. Les premières donnent un aperçu du fonctionnement interne du modèle alors que la deuxième permet d'établir des pronostics de durabilité et de durée de vie.

Les résultats de la simulation stochastique sont aussi présentés sous forme graphique.

Les modèles de dégradation des matériaux utilisés sont ceux développés dans le cadre du projet AMB et décrits en annexe A - EXEMPLES DE MODÈLES-MATÉRIAU.

Les deux exemples traités sont une façade ventilée avec un bardage extérieur en bois et une construction de toiture plate.

7.1 Façade ventilée

Le premier exemple d'étude de cas est une façade ventilée. Il s'agit d'une construction conventionnelle d'un mur en briques, isolé à l'extérieur par 10 cm de matelas de fibre de verre et recouvert d'un bardage en bois résineux ventilé avec un assemblage à rainures et languettes et fixé sur une sous-construction en bois. A l'intérieur, le mur est lissé au plâtre et peint à la dispersion. La composition est représentée en figure 7.1. Le composant est vertical (inclinaison=90°) et la face du bardage (A) est orientée en direction du sud.

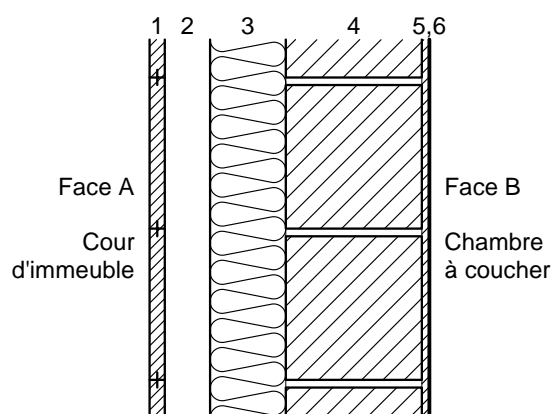


FIG. 7.1 – Façade ventilée - Coupe

N°	Couche	Matériau	Autres caractéristiques	Ep. [mm]
1	Bardage	Bois résineux	Joint à rainures et languettes	20
2	Sous-construction	Bois résineux		60
3	Isolation	Matelas de fibre de verre		100
4	Mur	Brique de terre cuite	Joint en ciment	180
5	Enduit	Plâtre		10
6	Peinture	Dispersion	Couleur claire	3K
Total				370

FIG. 7.2 – Composition d'une façade ventilée avec bardage en bois

Environnement

Elle est en contact avec un milieu *cour d'immeuble* au niveau du rez-de-chaussée à moins d'un mètre du sol. La face intérieure (B) donne sur une chambre à coucher. Par sa position proche du niveau de la terre, l'élément est traité comme un soubassement.

Milieu A

Nom	COUR D'IMMEUBLE
Type	Extérieur
Température min.	-5 °C
Humidité relative	85 %
Environnement	Tranquille, habitat
Fréquentation	Passante
Nuisances	Sans

Milieu B

Nom	CHAMBRE À COUCHER
Type	Intérieur
Température	20 °C
Humidité relative	40 %
Équipement	Chauffage, vent. mécanique
Fréquentation	Moyenne (3-8h/jour)
Intensité d'occ.	Faible
Activité	Sommeil
Nuisances	Sans

TAB. 7.1 – Attributs des milieux A et B

La définition des milieux A et B est montrée dans le tableau 7.1. Le milieu A COUR D'IMMEUBLE est de type *milieu-extérieur* selon la configuration en table 4.4. Le milieu B CHAMBRE À COUCHER est un *milieu intérieur* tel que défini dans la table 4.8.

Initialisation

A partir de la composition des couches de la façade ventilée et des deux milieux, l'outil crée le modèle de simulation. La figure 7.3 représente ce modèle composé d'une paroi contenant 6 objets-couche et de deux objets-milieu.

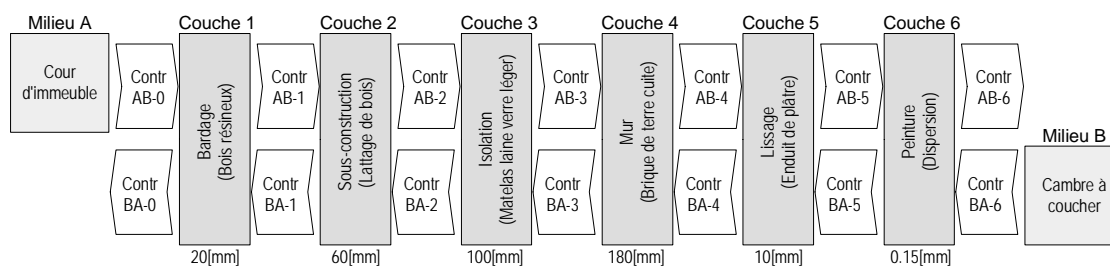


FIG. 7.3 – Modèle de simulation correspondant à l'exemple étudié

Les contraintes agissant sur l'élément de façade, calculées à partir des données du milieu extérieur et des attributs de la paroi, sont représentés dans la table 7.2.

Contrainte	Usure mécanique	Délavage	Poinçonnement	Chocs	Polluants	Mouillage	Vitesse d'air	Lumière	Soleil	Pression CO ₂	Valeur-pH	Température	Pression Vapeur	Humidité
Unité	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[pH]	[°C]	[Pa]	[%]
Contr. A.0 (Face A)	2	4.8	10	10	2.51	4.8	3.2	6	6	10	7	-2.6	340	82
Contr. B.0 (Face B)	1.6	0	1.6	1.6	1.1	0	2	1.5	0	10	7	19	917	41

TAB. 7.2 – Contraintes sur les faces A et B

La table 7.3 donne les performances initiales des diverses couches.

Couche	Epaisseur	Absorption de chocs	Etanch. Eau	Etanch. Air	Etanch. Lumière	Etanch. CO ₂	Valeur-pH	Rés. Statique	Rés. Usure	Rés. Chocs	Rés. Poinçonnement	Rés. Corrosion	Rés. Délavage	Aspect	Etat de surface	Rés. thermique	Rés. à la vapeur
Unités	[mm]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[pH]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[0..10]	[W/m2K]	[mg/h m Pa]
Bardage Bois	20	8	1.5	6	10	10	7	5	10	8	5	10	-2.3	8	7	7.1	10
Lattage de bois	60	0	0	0	1	0	7	0	-10	0	0	10	-10	5	0	0	0
Matelas laine verre léger	100	1	1	1	10	0	7	1	-3.3	10	1	10	-3.3	1	1	25	1.6
Brique de terre cuite	180	10	3	9	10	10	7	0	6	6	7	10	10	6	4	2.2	6.7
Enduit au plâtre	10	0	7	9	10	10	7	1	-3.3	5	5	10	-6.6	8	7	2.5	10
Peinture Dispersion	0.2	0	7	10	10	10	7	1	2	1	5	10	4.3	8	9	5	14.3

TAB. 7.3 – Performances initiales des diverses couches

Simulation

La simulation est effectuée sur une durée de 100 ans avec un intervalle de temps Δt de 1 an. La figure 7.4 montre l'état du modèle à deux moments de la simulation, à l'état neuf ($t=0$) et après 50 ans. Cette figure est tirée de l'outil de simulation, dans lequel tous les paramètres peuvent être visionnés dynamiquement par une animation.

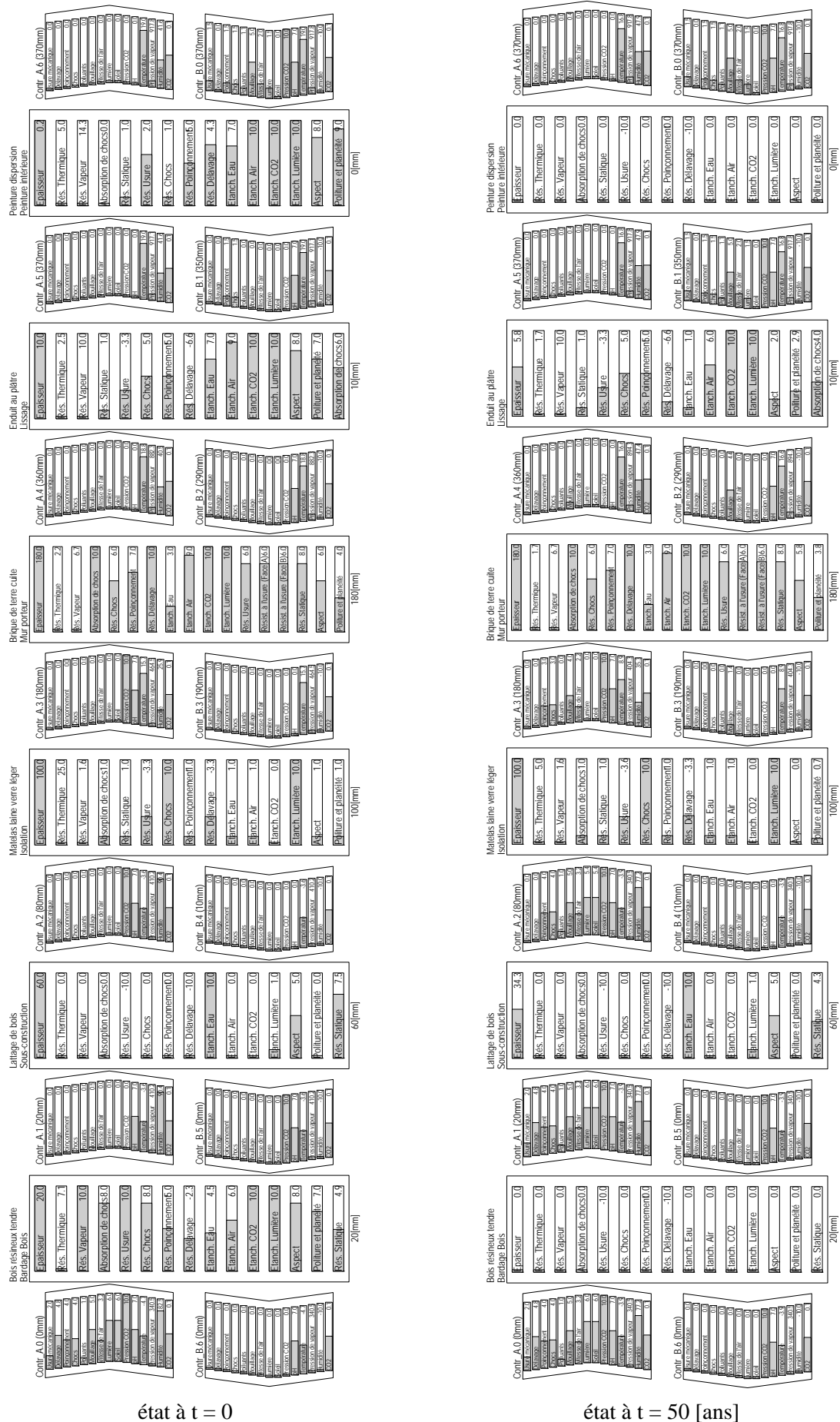


FIG. 7.4 – Etat du modèle à l'initialisation et au temps de calcul 50 ans

Résultats

La simulation discrète permet d'analyser les courbes de performances. La figure 7.5 montre l'évolution des performances *Épaisseur* à titre d'exemple. Un affichage de l'évolution de toutes les performances et contraintes est représenté à la figure 7.7. Elle permet d'observer l'enchaînement de la dégradation des différentes couches ainsi que la progression des contraintes en cours du vieillissement.

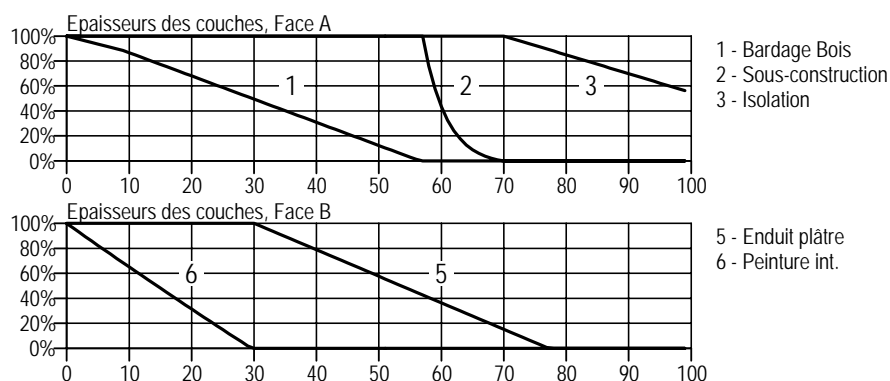


FIG. 7.5 – Evolution des Performances Épaisseur en pourcentage de l'épaisseur originale

Le tableau 7.4 résume l'apparition des événements des premiers 100 ans pour une simulation avec des paramètres discrets ainsi que pour une simulation stochastique avec 1'000 essais. Les événements sont numérotés en chiffres romains.

N°	Élément	Message	Niveau alarme	Sim. discrète	Moy. μ	Dev.Std. σ	Probabilité de défaillance		
							20%	50%	80 %
I	Peinture Dispersion	Couche fortement affectée	5	30	30.6	6.5	24	29	35
II	Bardage	Couche fortement affectée	5	57	56.6	3.1	53	56	59
III	Sous-Construction	Exposé à l'eau (risque de pourriture)	4	58	57.6	4.1	54	57	60
IV	Isolation	Humidification	3	25	57.6	3.7	54	57	60
V	Façade ventilée	Diminution importante de l'isolation thermique	2	59	60.2	3.8	57	60	62
VI	Sous-Construction	Couche fortement affectée	5	70	69.6	3.8	66	69	72
VII	Plâtre	Couche fortement affectée	5	78	77.6	10.3	68	78	88

valeurs exprimées en années

TAB. 7.4 – Evènements de défaillance

Résultats d'une simulation discrète ainsi que d'une simulation stochastique avec 1000 essais

Ces résultats confirment les attentes intuitives concernant les enchaînements de phénomènes de dégradation de ce type de construction tout en fournissant des indications quantitatives de durée. Côté intérieur, la peinture dispersion est défaillante après env. 30 ans (événement n°I) et côté extérieur le bardage après env. 57 ans (II). Sur cette face on peut également observer l'humidification de la sous-construction (III) ainsi que la diminution du pouvoir isolant de la laine de verre (VI et V). A 60 ans, ces événements suivent très rapidement la défaillance du bardage. Dans l'intervalle des 100 ans simulés on doit également s'attendre à la défaillance du lissage de plâtre sur la face intérieure.

Le tableau 7.4 permet également d'observer que les résultats issus d'une simulation avec des paramètres discrets sont très proches des moyennes obtenues par une simulation Monte Carlo (voir chapitre 4.4.2). Ceci

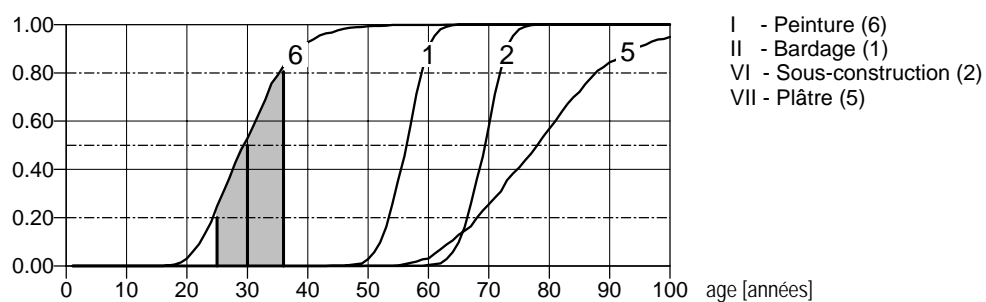


FIG. 7.6 – Fonctions de répartition pour des évènements de niveau 5.
La distribution de la couche peinture est mise en évidence

car les moyennes des ces distributions sont proches des valeurs discrètes.

La figure 7.6 illustre les fonctions de répartition des différents évènements listés dans la figure 7.4.

Pour définir la durée de vie de cet élément, il paraît judicieux de prendre les évènements II et III comme critère de défaillance. Ceci car la disparition de la peinture est à considérer comme un évènement qui n'affecte que l'apparence de l'élément, dans un premier temps. Considérant cela, on peut, d'après le tableau 7.4, affirmer que la durée de vie de l'élément de façade analysée se situe entre 53 et 59 ans.

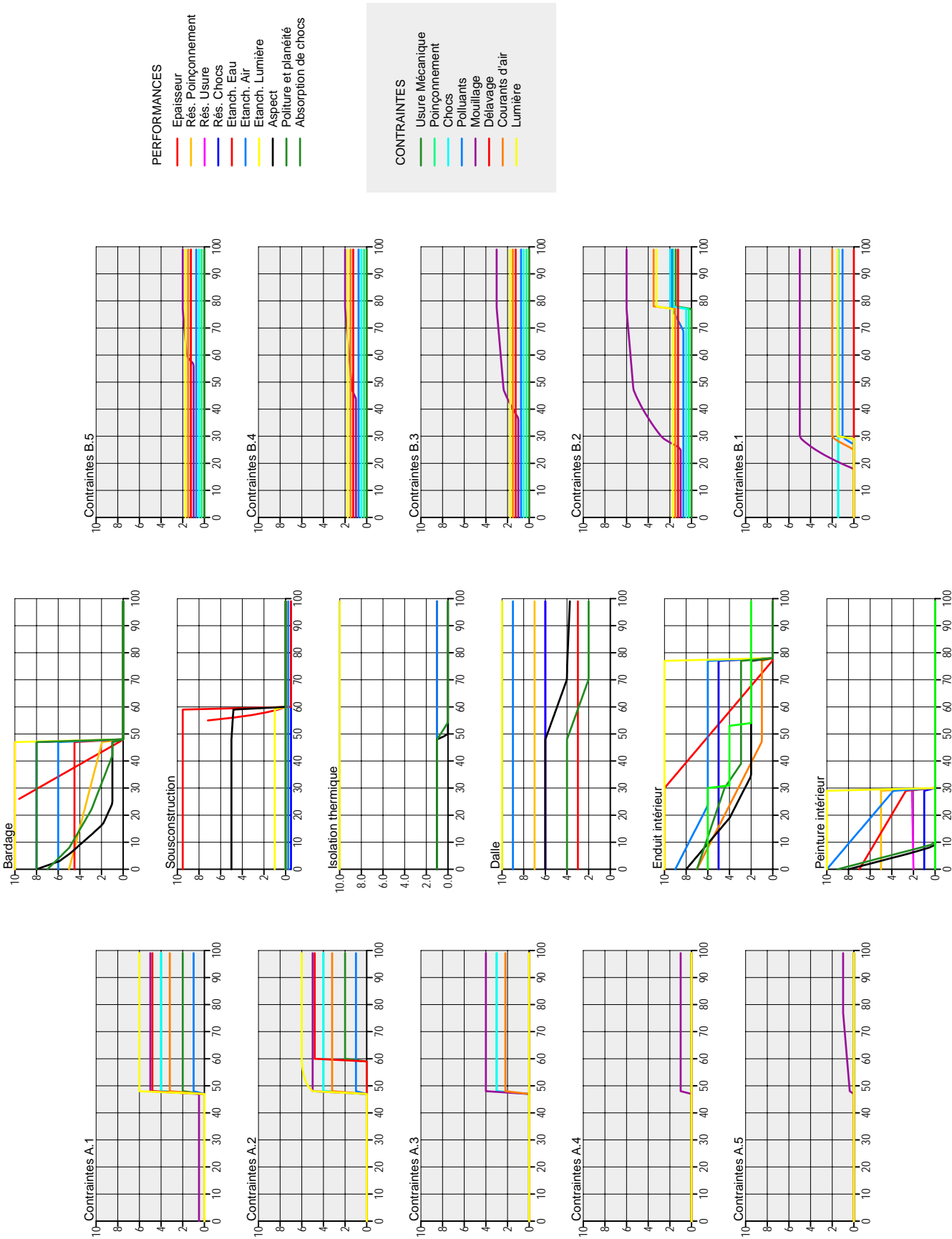


FIG. 7.7 – Courbes de performances et de contraintes

7.2 Toiture plate

Composition de l'élément

Le deuxième exemple est une toiture plate dont la construction est représentée dans la figure 7.8 et dans le tableau 7.9. Elle est composée d'une dalle en béton de 20 cm d'épaisseur recouverte en bas, par une finition composée d'un lissage au plâtre et d'une peinture dispersion. Sur la dalle, se trouvent une couche de laine de verre de 10 cm comme isolation et une étanchéité en carton bitumé soudé. L'étanchéité est recouverte d'une couche de gravier de 5 cm.

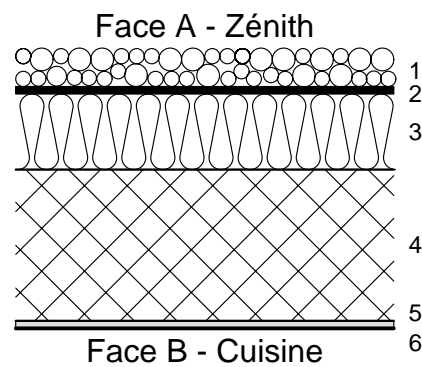


FIG. 7.8 – Coupe toiture plate

N°	Couche	Matériau	Autres caractéristiques	Ep. [mm]
1	Lestage	Gravier		50
2	Etanchéité	Carton bitumé	Soudé	1K
3	Isolation	Matelas de fibre de verre		100
4	Dalle	Béton non armé	Qualité moyenne	200
5	Enduit	Plâtre		5
6	Peinture	Dispersion	Couleur claire	2K
Total				357

FIG. 7.9 – Composition de la toiture plate

La figure 7.10 montre l'objet *Toiture plate* avec la configuration des paramètres. Il a une pente de 0° et se trouve au 8^e étage sans protections particulières. La configuration des couches avec l'indication de leur épaisseur est également représentée. Le poids ainsi que la valeur U sont affichés en bas à gauche de la fenêtre.

Dialogue Paroi

Nom de la paroi:
Toiture Plate - Etude de cas 2

Année de construction:
0

Milieu A :
Zénith

Pente [deg] :
0

Couches :
Ajouter Couche

Type d'élément:
Toit-plat

Nom	Ep. [mm]
Gravier	50.00
Etanchéité	2.00
Isolation thermique	100.00
Dalle	200.00
Enduit au plâtre	5.00
Peinture dispersion	0.10

Poids= 573.32 [kg/m3]

Ep. Total : 357.10

Milieu B :
Cuisine

Valeur U= 0.35 [w/m2K]

Zénith

Cuisine

Orientation:
☒ Nord
☐ Est
☐ Sud
☐ Ouest

Etage:
☒ > 8
☐ 4 à 8
☐ Rez (>1m du sol) à 3
☐ Rez (<1m du sol)
☐ Sous-sol

Protections contre:

☐ Soleil
☐ Vent
☐ Pluie

☐ Eau
☐ Chocs

Ok

Annuler

FIG. 7.10 – Dialogue pour définir l'objet *Paroi*

Environnement

La face A est orientée vers le zénith et la face B vers une cuisine. La figure 7.2 indique la configuration des deux Objets-Milieu.

Milieu A

Nom	ZÉNITH
Type	Extérieur
Température min.	-5 °C
Humidité relative	85 %
Environnement	Calme
Fréquentation	Nulle
Nuisances	Polluants

Milieu B

Nom	CUISINE
Type	Intérieur
Température	20 °C
Humidité relative	75 %
Équipement	Chauffage, vent. mécanique, amnée d'eau
Fréquentation	Fréquenté (>8h/jour)
Intensité d'occ.	Faible
Activité	Lourde, manuelle
Nuisances	Polluants, forte humidité, lavage

TAB. 7.5 – Attributs des milieux A et B

Initialisation

Les contraintes agissant sur les faces A et B sont représentées dans la table 7.6.

Contrainte	Usure mécanique	Délavage	Poinçonnement	Chocs	Polluants	Mouillage	Vitesse d'air	Lumière	Soleil	Pression CO ₂	Valeur-pH	Température	Pression Vapeur	Humidité
Unité	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[pH]	[°C]	[Pa]	[%]
Contr A.0 (Face A)	2	10	2	2	4	8	5	10	10	10	7	-2.6	370	70
Contr B.0 (Face B)	0.2	0	0.2	0.2	1.4	2	2	2	0	10	7	13	1762	100

TAB. 7.6 – Contraintes sur les faces A et B

Simulation

La durée de simulation est de 100 ans avec un intervalle de temps Δt de 1 an.

Résultats

Le tableau 7.7 montre les résultats des simulations. La liste des événements relève que le premier dégât concerne la couche de gravier après env. 40 ans de service (événement I dans le tableau). Cette disparition partielle du gravier met la couche d'étanchéité à nu. Elle sera percée par la suite (II). Ceci provoque des infiltrations d'eau dans la couche d'isolation (III) ce qui a comme conséquence la perte de son pouvoir isolant (IV). Le dernier événement (V) indique la disparition partielle de la couche d'étanchéité.

N°	Elément	Message	Niveau alarme	Sim. discrète	Moy. μ	Dev.Std. σ	Probabilité de défaillance		
							20%	50%	80 %
I	Gravier	Couche fortement atteinte	5	40	39.39	2.76	37	39	41
II	Etanchéité	N'assure plus l'étanchéité à l'eau	4	51	46.41	4.72	42	47	51
III	Isolation thermique	Humidification.	3	52	46.88	6.21	42	47	51
IV	Tout	Diminution importante de l'isolation thermique.	2	58	52.39	6.55	45	54	57
V	Etanchéité	Couche fortement atteinte	5	90	86.82	7.61	81	89	99

valeurs exprimées en années

TAB. 7.7 – Evénements de défaillance

Résultats d'une simulation discrète ainsi que d'une simulation stochastique avec 1000 essais

Le tableau 7.7 permet également de comparer les résultats de la simulation discrète avec ceux de la simulation stochastique. On peut constater que les résultats discrets sont plus pessimistes que les résultats stochastiques.

Pour donner une estimation de la durée de vie de cette toiture, on peut s'appuyer sur l'événement II - *Etanchéité défectueuse*. Arrondi, elle sera entre 40 et 50 ans. Ceci correspond aux valeurs données par des experts.

La figure 7.11 montre la fonction de répartition pour les événements I à IV.

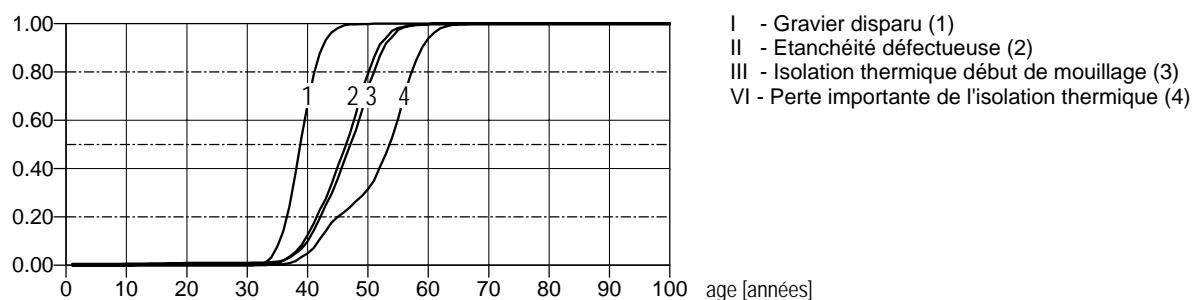


FIG. 7.11 – Fonctions de répartition pour les événements I à VI

Chapitre 8

Conclusions

Les recherches et les investigations effectuées dans le cadre de l'élaboration de cette thèse ont avant tout mis en évidence la complexité de la science de la durabilité ainsi que la difficulté de comprendre et de reproduire virtuellement les phénomènes de dégradation. Il n'a pas été facile de dégager des règles systématiques et globales, ni de structurer l'ensemble de toute la connaissance, décrite dans une grande quantité d'écrits publiés.

Dans un premier temps, il a été constaté que les termes *durabilité* et *durée de vie* sont souvent utilisés dans des contextes différents et n'ont pas toujours la même signification. Pour comparer les différentes approches, utilisant ou déterminant la durée de vie, il est important de définir ce qui est compris par ces termes. Dans la démarche traitée dans cette thèse, il s'agit clairement d'obtenir des informations concernant l'obsolescence matérielle, partielle ou complète, provoquée par des phénomènes de vieillissement naturels. D'autres types d'obsolescence tout comme des destructions accidentelles ne sont pas pris en compte. On doit toutefois admettre que ce stade de défaillance physique n'est que rarement atteint parce que, pour d'autres motifs, l'élément est démonté, remplacé ou rénové auparavant. Malgré cela, ce type de prévisions a sa raison d'être, car il peut fournir des informations multiples, utiles à différents stades de planification et d'exploitation d'un bâtiment (voir paragraphe 1.3).

8.1 Apports originaux

Description du modèle

Le premier objectif de ce travail était d'établir une description de la construction et du fonctionnement d'un outil permettant de simuler le vieillissement d'éléments de construction. Cette description est donnée principalement dans les chapitres 3 MÉTHODE et 4 MODÈLE.

Concernant la *Méthode* on peut relever que le principe de base de la simulation consiste à modéliser l'interaction entre les *contraintes* provoquées par l'environnement et les *performances* des matériaux. Cette interaction est de deux natures. Ce sont d'une part les règles de la *propagation des contraintes* et d'autre part celles de la *variation des performances*. Les premières décrivent comment les contraintes peuvent pénétrer à l'intérieur de l'élément, les secondes permettent de calculer la détérioration des performances en fonction des contraintes. La détermination des contraintes à la surface se fait à partir de la description des *milieux* environnants. Les *courbes de performances* sont obtenues par itération de ces règles. L'introduction des notions de *rôles* et d'*exigences* permet d'introduire des critères de performances minimales puis de détecter l'apparition de désordres et de défaillances.

Le chapitre 4 MODÈLE montre l'application des principes décrits dans la *Méthode* dans l'outil de simulation. Il illustre comment l'élément de construction, les milieux et les matériaux ont été implémentés sous forme d'*objets* pour créer un modèle de simulation. La représentation graphique du modèle (figure 4.2) a permis de visualiser la position de chaque partie à l'intérieur du modèle global tout comme elle montre les

relations que les différents objets entretiennent entre eux. La présentation séparée de chaque *classe d'objet* a permis de décrire les paramètres introduits pour configurer les objets et de préciser les différents rôles qu'ils ont à jouer dans la simulation.

Ce chapitre explique aussi le déroulement de la simulation à travers les différentes tâches à accomplir :

- *Initialisation des paramètres* (paragraphe 4.2.1 et chapitre 5)
- *Propagation des contraintes* (paragraphe 3.6.1 et 4.2.2)
- *Mise à jour des performances* (paragraphe 3.6.2 et 4.2.3)
- *Détection des défaillances* (paragraphe 3.8, 3.9 et 4.2.1)

Définition de l'intervalle de temps Δt

Actuellement, la simulation se fait avec un intervalle de temps Δt d'un an. Il a été démontré au paragraphe 4.3 que ce choix est un bon compromis entre la précision de calcul et la vitesse de simulation. Ceci permet de simuler des phénomènes qui se répètent annuellement sans toutefois aller dans les détails. Une diminution de la durée demanderait de tenir compte de phénomènes saisonniers voir journaliers, ce qui n'est pour le moment pas envisagé. L'erreur systémique de ce choix est inférieure à l'erreur découlant de l'incertitude des paramètres.

Simulation stochastique

A l'origine, l'outil était conçu pour effectuer des simulations avec des paramètres discrets. Pour tenir compte de l'incertitude de divers facteurs et obtenir des résultats sous forme de distributions aléatoires, des variables aléatoires ont été introduites à la place de certains paramètres discrets. Ainsi il est devenu possible d'effectuer des simulations selon la méthode *Monte Carlo* (voir paragraphe 4.4). Les résultats obtenus avec cette méthode peuvent être présentés par des *courbes de défaillance* et par des indications chiffrées. Il a été démontré que des simulations avec 1000 essais constituent un bon compromis entre temps de calcul et précision du résultat.

Contraintes

La présentation des différentes contraintes au chapitre 5 a montré comment le concept de *Contrainte* peut être mis en relation avec les différentes formes de sollicitations. Ceci par l'identification des facteurs déterminants et par l'établissement d'une échelle de niveaux adéquate pour chacun des types de sollicitation.

Performances

La description des performances au chapitre 6 a permis de donner la définition des échelles de niveaux pour les performances de base utilisées dans la modélisation des matériaux.

Forme et présentation des résultats

De même que la création du modèle nécessite de connaître d'innombrables paramètres, la simulation génère un grand nombre de résultats qui peuvent être analysés et interprétés de diverses manières. Les exemples présentés au chapitre 7 illustrent les diverses formes de présentation.

Deux premières formes de présentation sont les *Courbes de performances* et la *liste d'évènements de défaillance*. Les premiers affichent l'évolution des performances globales dans le temps alors que les seconds constituent un calendrier avec les divers événements enregistrés au cours de la durée de simulation. L'attribution d'un degré de gravité à chaque type d'évènement permet de distinguer entre des événements de minime importance et divers niveaux de défaillance. Ces formes de représentation ont déjà été implémentées dans l'outil AMB et permettent d'avoir une vue générale du comportement d'un composant sur la base d'une simulation discrète.

Lors de la réécriture du code de programmation dans le cadre de ce travail, l'évolution dans la *programmation orientée objet* ainsi que l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs a permis d'intégrer

un module d'enregistrement de l'évolution de tous les paramètres ainsi que la visualisation dynamique des ces derniers. Ceci permet une analyse plus détaillée du comportement du modèle mettant en évidence l'enchaînement en cascade des phénomènes de dégradation ainsi que l'évolution de la propagation des contraintes à l'intérieur du composant. Au delà de l'illustration dynamique des phénomènes, cette forme de présentation est utile pour tester le bon fonctionnement du logiciel ainsi que des différents objets-matériau.

Les résultats de *Simulations Monte Carlo* permettent d'établir les *courbes de défaillances* et un pronostic probabiliste concernant les différents événements de la liste des défaillances. Ceci peut être utilisé pour déterminer la durée de vie du composant ou servir de base pour toute autre planification en relation avec sa durabilité.

8.1.1 Relations avec d'autres méthodes

La comparaison avec d'autres méthodes de prévision de la durée de vie d'éléments de construction permet de mettre en évidence certains parallèles et interdépendances.

Principe itératif

Le fait de réactualiser les performances à chaque cycle de calcul par un procédé itératif s'apparente au principe de la chaîne de Markov décrite au point 2.3.6. Il a été relevé que, la durée d'intervalle Δt étant d'une année, on peut admettre que le système n'a pas de mémoire et que l'état $E(t + \Delta t)$ dépend uniquement de l'état $E(t)$.

Surveillance des performances

La comparaison des performances avec des valeurs limites pour détecter des défaillances est un principe qui est également appliqué dans la Méthode des Limites de Performance PLM (paragraphe 2.3.5) ainsi que dans l'estimation de la durée de vie basée sur l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) (paragraphe 2.3.4). Dans ces deux approches, les valeurs-limites de performance sont utilisées pour détecter la défaillance et la fin de vie du composant. Globalement, la simulation AMB utilise le même principe pour générer une liste d'événements. En plus, par l'introduction de toutes sortes de limites, elle peut fournir des informations concernant des dégradations mineures ou partielles et par la surveillance des niveaux de contraintes à l'intérieur du composant, elle peut détecter le début de phénomènes particuliers tels que la corrosion ou le mouillage de matériaux isolants. Ceci permet d'avoir une vision différenciée des dégradations de l'élément analysé et, en cas de nécessité, de modifier sa conception ou de prévoir une maintenance préventive.

Echange de résultats

La comparaison avec les différentes méthodes de prévision de la durée de vie de matériaux (paragraphe 2.3) relève également qu'elles sont complémentaires et il est imaginable, voir souhaitable, que les résultats des unes puissent alimenter les autres.

Dans cette optique, on peut p. ex. envisager d'utiliser l'outil, présenté dans cette thèse, pour déterminer la durée de vie de référence (RSL) ou des facteurs modifiants pour des analyses basées sur la méthode factorielle (paragraphe 2.3.3). Dans l'autre sens, les résultats des essais de vieillissement (paragraphe 2.3.7) peuvent être des données précieuses pour développer et améliorer les modèles de matériaux de la simulation.

8.2 Bilan

Globalement on doit admettre que la large gamme des matériaux de construction avec leurs caractéristiques et leurs comportements spécifiques d'une part, et la diversité de leur exposition à des actions multiples d'autre part, rendent une approche générale et quantitative de leur durabilité très difficile. Dans ce sens, la méthode présentée se veut comme une recherche d'un dénominateur commun. Par la mise en relation des

concepts de *Performance* et de *Contrainte*, elle propose à la fois de rendre homogène des caractéristiques et des phénomènes très variés et disparates tout comme elle tente de les quantifier.

Les données scientifiques pour effectuer de tels modèles ne sont pour l'instant que très partiellement disponibles. Ceci malgré une utilisation très fréquente de certains matériaux depuis de nombreuses d'années. Nous ne sommes aujourd'hui qu'au début de la recherche visant à quantifier et modéliser les comportements de dégradation des matériaux de construction. La science actuelle peut décrire les phénomènes et identifier les facteurs d'influence qui interviennent dans ces processus sans pour autant les quantifier précisément. C'est une des grandes difficultés de cette méthode qui a pour ambition d'approcher la question du vieillissement des éléments de construction d'une façon globale.

Pour intégrer, dans un outil de planification et d'évaluation, les résultats des innombrables recherches effectuées dans les domaines de la pathologie et de la durabilité, on doit passer par une homogénéisation et une structuration de l'information et du savoir.

Potentiel de la méthode

En contrepartie, les perspectives, en cas de réussite, même partielle, sont très prometteuses. La modélisation étant basée sur les propriétés et les comportements individuels des matériaux, on peut imaginer un nombre infini de combinaisons de matériaux différents. L'outil sera alors pour chaque variante capable d'évaluer son comportement propre au vieillissement. Ainsi, pour analyser une nouvelle composition de matériau ou un nouveau type de construction, il ne sera pas nécessaire de faire des essais de vieillissement et d'attendre des semaines, des mois sinon des années pour obtenir les premiers résultats. Dans ces cas, l'outil de prédiction devrait pouvoir donner des indications de dégradation instantanément.

Un autre aspect concerne le fait que cette méthode calcule et surveille l'évolution des performances. Ainsi, par attribution à chaque anomalie, d'un degré de gravité, il devient possible d'évaluer le risque de dégradation de manière nuancée et, le cas échéant, de planifier la maintenance de l'élément.

Le principe de mettre à jour les performances à intervalles réguliers permet également d'interrompre le calcul à un moment voulu et d'intervenir, soit sur les performances, soit sur le modèle même. Ceci équivaldrait dans le premier cas à une réparation ou une réfection des couches modifiées, dans le deuxième cas à une transformation de l'élément de construction. Le calcul peut continuer après ces modifications.

8.3 Perspectives de recherche

Comme dit plus haut, de nombreuses données, nécessaires à l'élaboration des modèles-matériaux et modèles-actions ne sont, pour l'instant, pas disponibles et ont dû être estimées par l'expert sur la base de son expérience ainsi que d'une recherche approfondie. Pour dépasser ce stade intuitif et établir des relations confirmées entre les actions destructrices et les courbes de vieillissement, il est encore nécessaire de procéder à de nombreuses investigations.

Relation entre agents et contraintes

Un premier champ d'investigation qui doit encore être approfondi est la recherche sur les actions provoquant le vieillissement. Bien que ces agents aient été identifiés et mis en relation avec les processus de dégradation, il manque, à l'heure actuelle, des données numériques concernant l'intensité et la fréquence de ces actions en fonction des différents types de *Milieus* et de situation. Pour les besoins de la simulation, diverses échelles de niveau de contraintes ont été définies en essayant d'établir des relations entre des actions concrètes et leur impact sur le composant. Pour un futur développement du modèle, il est important de confirmer ces choix d'échelles et d'établir des règles de conversion en grandeurs mesurables. Ainsi il deviendrait possible de mettre au point des essais pour déterminer la résistance des matériaux à tous les agents.

Vérification de la simulation avec des cas concrets

Un deuxième domaine pour de futures recherches est la collecte de données sur des matériaux et des composants vieilliss. Que ce soit par le biais d'essais de vieillissement ou par la récolte systématique d'échantillons provenant de bâtiments, il est important de mener ces investigations de façon à pouvoir mettre en relation l'état et l'âge de l'objet avec les actions subies.

Ces types de données sont indispensables pour :

- * définir les niveaux de performances initiales de matériaux
- * pouvoir établir des relations *réponse à la dose* pour chaque matériau et chaque type de contrainte.
- * attribuer des valeurs limites de performance en fonction des différents rôles des éléments.
- * constituer un jeu d'objets témoins permettant de vérifier les résultats de simulation par comparaison avec des données mesurées, ceci dans le but de valider le modèle.

Concernant l'outil, cela permettrait de vérifier les modèles des matériaux déjà implémentés ainsi que de créer de nouveaux modèles pour les matériaux manquants.

Evolution de l'outil prédictif

Un autre point de futures recherches concerne le développement des fonctionnalités de l'outil informatique. Dans un premier temps, on devrait créer une version destinée à des experts en pathologie afin que ces spécialistes puissent tester les matériaux et les fonctions déjà implémentés dans l'outil et comparer les résultats de simulation avec leurs propres expériences et intuitions. Ceci peut se faire facilement car avec la réécriture du code de programmation, des fonctions multi-langage ont été intégrées. Pour diffuser une version-expert au niveau international, il suffit donc de traduire les divers textes, actuellement disponibles en français uniquement.

Dans une phase suivante on peut également imaginer de faire évoluer l'outil vers une version permettant à d'autres chercheurs d'ajouter librement de nouveaux matériaux ou d'améliorer le comportement de matériaux déjà modélisés. Etant donné que les experts en pathologie ne sont pas forcément des spécialistes de programmation, cela devrait se faire par l'ajout d'un module qui permettrait la définition du comportement des matériaux dans un langage spécifique. L'utilisation d'une syntaxe particulière permettrait à ces spécialistes de pouvoir se concentrer sur la description des matériaux sans devoir se préoccuper de la programmation propre de l'outil.

Enfin, on devrait rendre la simulation accessible à des planificateurs ou à d'autres acteurs de la construction. Ceci en tant qu'outil à part entière, tel que ce fût le cas avec la version Macintosh d'AMB ou, sous forme de modules, intégrés dans d'autres outils d'évaluation et de gestion d'immeubles.

8.4 Le mot de la fin

Après toutes les investigations menées pour analyser, restructurer, programmer, illustrer et décrire cette modélisation du vieillissement des matériaux de construction l'auteur continue de penser que l'idée de vouloir traiter, dans un seul outil, les matériaux et les situations les plus variés est certes ambitieuse mais semble être réalisable. C'est pourquoi il espère, à travers cette thèse, avoir contribué au développement de cette démarche innovante afin qu'elle puisse être un jour menée jusqu'au bout.

ANNEXES

Annexe A

Exemples de Modèles-matériau

Le comportement du vieillissement des matériaux de construction dépend essentiellement de leur structure chimique et physique. Certains phénomènes sont similaires voir identiques pour des familles de matériaux. La hiérarchie des classes-matériau, telle qu'elle a été prévue dans l'outil de simulation, a déjà été présentée au paragraphe 4.1.2 - *Objet-couche ou objet-matériau*. Dans cette annexe, il s'agit de donner quelques exemples de classes-matériau.

Pour modéliser les processus de dégradation, les matériaux de construction, couramment utilisés, ont été regroupés par famille selon leur nature ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques. Le tableau A.2 énumère les différentes familles ainsi que les matériaux qui en font partie. Dans la construction des modèles de matériaux, ces familles forment à chaque fois une classe qui est dérivée de la classe de base et qui constitue l'ancêtre pour les différentes classes-matériaux.

Certains matériaux de construction sont des réunions de plusieurs matériaux, composés d'un agrégat ainsi que d'un liant qui "colle" les différentes parties sont assemblés pour former un tout. Parmi ces réunions on peut citer les bétons, les mortiers, les peintures, les bois reconstitués, les isolants fibreux etc. Dans la classification, une partie des réunions, comme les hydrauliques ou les peintures, constituent des familles à part. Ceci parce que leur comportement au vieillissement dépend essentiellement d'un des composants, en général le liant. D'autres ont été mis dans la famille des agglomérés parce qu'ils présentent des caractéristiques particulières. Ceci est notamment le cas des agglomérés de bois qui sont usuellement classés avec les bois¹.

Etant donné du nombre important de matériaux pour lesquels on devrait, idéalement, créer un modèle, il est impossible de dresser un tableau complet et systématique dans le cadre de cette thèse. Ce travail serait une tâche de longue haleine qui prendrait plusieurs années. Toutefois, pour tester la démarche, nous avons mené ce type d'investigations sur quelques matériaux. Comme pour les contraintes (chapitre 5) et les performances (chapitre 6, il s'agissait d'extraire, de la documentation, les informations les plus pertinentes pour la simulation. Pour les matériaux, ceci concernait les valeurs de performance ainsi que les facteurs influençant la dégradation.

Après des considérations générales et une revue des facteurs d'influence, les valeurs de performance initiales ainsi que les paramètres pour l'algorithme de la variation des performances (ΔP , voir paragraphe 4.2.3) sont présentés. Les données concernant les performances initiales et les valeurs ΔP ont été développées dans le cadre du projet AMB.

¹Voir Hegger et al. (2005), p.66 ss.

Groupe	Nom	Description
Métaux	Métaux ferreux	Les différents types d'aciers utilisés dans la construction pour des éléments surfaciques tels que les tôles et les aciers d'armatures
	Métaux non ferreux	Les autres métaux, non ferreux, tel que l'aluminium, le cuivre, le zinc etc. sous forme de tôle ou de revêtements galvaniques
Minéraux	Pierreux	Les pierres naturelles sous forme de pierre de maçonnerie, pierre de placage ou de gravier
	Hydrauliques	Tous les matériaux liés à base de liants hydrauliques, c.-à-d. du ciment portland ou de la chaux. On y trouve les bétons de ciment ainsi que les mortiers à base de chaux et/ou de ciment. Le regroupement se justifie parce que tous ces matériaux se carbonatent.
	Plâtre	Les matériaux à base de plâtre sous forme de plots, de plaques ou d'enduits
	Terres cuites	Les matériaux à base de terre cuite sous forme de briques ou de tuiles
	Céramiques	Les matériaux de revêtement à base d'argile cuit soit les faïences ou les carrelages
	Verres	Les différents matériaux à base de verre sous forme de plaques ou de mousse
Organiques	Bois	Les bois naturels feuillus ou résineux
	Bitumineux	Les matériaux à base de bitume ou d'asphalte sous forme de carreaux, de feuilles d'étanchéité, d'enrobés ou de chape
	Mousses polymères	Les mousses isolantes à base de polystyrène, PUR et UF sous forme de plaques ou projeté
	Polymères	Les feuilles, plaques et textiles synthétiques
	Peintures	Les filmogènes synthétiques minces comme les peintures, les glakis, les vernis ou les enduits de résine
Mixtes	Agglomérés	Diverses formes de matériaux agglomérés tels que les laines isolantes, les panneaux de bois agglomérés ou des agglomérés bois-ciment
Gaz	Couches d'air	Les différents types de couches d'air que l'on retrouve dans les éléments surfaciques soit des couches ventilées, confinées ou déshydratées
Virtuels	Inconnu	Matériau virtuel avec de propriétés idéales. Il permet de stopper la progression de toute contrainte directionnelle. Il permet aussi de se substituer aux matériaux inconnus

TAB. A.2 – Classification des matériaux pour la modélisation du vieillissement

A.1 Métaux

L'utilisation des métaux est largement répandue dans la construction. Le cuivre mis à part, ils ne sont toutefois jamais utilisés dans une forme pure mais toujours en tant qu'alliage de plusieurs éléments métalliques. Ces "mélanges" entre plusieurs éléments métalliques permettent d'améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques et chimiques. Ainsi, des ajouts de métaux spécifiques, même en petite quantité, peuvent changer les caractéristiques à un tel point que l'on doit considérer chaque alliage comme un matériau à part entière. C'est pourquoi il existe potentiellement un nombre infini de métaux avec des caractéristiques fort variables et parfois étonnantes². Cependant, une construction demande des quantités importantes de matériaux que l'on doit se limiter à des métaux disponibles en grande quantité et peu chers à la production et la mise en œuvre. C'est le cas notamment pour les métaux à base de fer, mais aussi pour l'aluminium, le cuivre, le zinc le plomb etc.

On classifie couramment les métaux selon leur poids en métaux lourds ou en métaux légers. Dans le domaine de la construction, dû à la grande importance des aciers, on préfère distinguer entre *métaux ferreux* et *métaux non-ferreux*. La figure A.1 montre les principaux métaux utilisés dans le domaine de la construction.

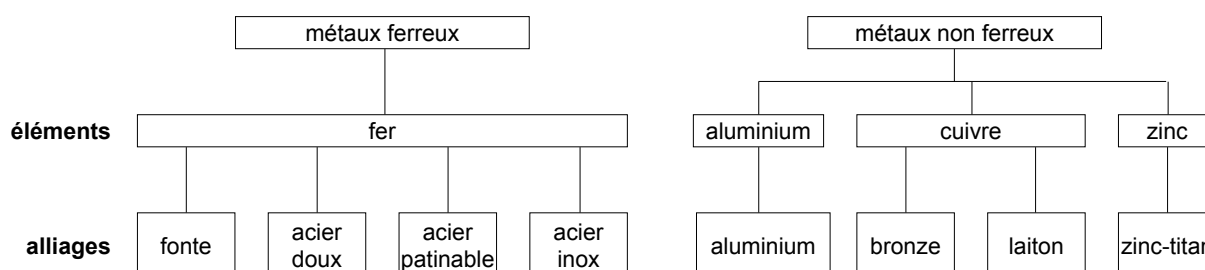


FIG. A.1 – Métaux et alliages utilisés dans la construction
(adapté de : Hegger et al, 2005, B 7.2, p.77)

Caractéristiques

En plus de leurs qualités mécaniques, les métaux sont également des matériaux sans pores et étanches. Ceci les prédestine pour être utilisés comme étanchéités ou comme protections contre des actions mécaniques.

Dans la construction, la mise en oeuvre des métaux se fait normalement en deux phases, c.-à-d. les pièces métalliques sont d'abord usinées et préparées à l'atelier avant d'être montées sur le chantier. On les trouve sous forme de tôles ou de profils assemblés par vis, par sertissage, par pliage ou par soudure. Certaines performances, notamment les étanchéités, dépendent alors plutôt du mode d'assemblage (type de joint) ou de leur nature (perforé ou plein) que des caractéristiques propres du métal.

Pathologies

Une des pathologie rencontrée fréquemment est due au fait que les métaux s'échauffent fortement lorsqu'ils sont exposés directement au soleil. Cet échauffement est accompagné d'une dilatation thermique importante qui doit pouvoir être absorbée par les assemblages et les fixations, sinon les tensions internes augmentent et conduisent généralement à des déformations.

La principale pathologie des métaux par contre est la corrosion. Elle est due à leur tendance à s'oxyder lorsque certaines conditions sont réunies. Dans le cadre de ce travail nous avons décidé de présenter deux types de corrosion comme exemple de phénomènes de dégradation bien étudiés et documenté. Il s'agit de la corrosion atmosphérique ainsi que de la corrosion des fers d'armatures des bétons armés. La première est décrite au paragraphe suivant car elle concerne tous les matériaux. Elle sera appliquée pour les tôles d'acier

²Comme exemple, on peut citer les alliages supraconducteurs qui perdent leur résistance électrique à des températures proches du zéro.

doux (paragraphe A.1.2). La deuxième concerne les fers d'armatures et sera traitée dans le paragraphe A.1.2.

Protection contre la corrosion

Dans les mesures à prendre, pour protéger les tôles ou pièces métalliques contre la corrosion, on distingue entre deux méthodes : la protection passive et la protection active.

La *protection passive* consiste à revêtir l'élément de construction d'une couche protectrice et ainsi empêcher le liquide électrolytique (eau) d'atteindre le métal. Il existe une grande variété de revêtements qui peuvent remplir ce rôle tel que :

- les peintures
- le zingage³
- les revêtements en matières plastiques
- la galvanisation
- l'émaillage
- l'oxydation anodique⁴

Le zingage constitue une combinaison des deux catégories de protection car son électro-potential plus bas que l'acier assure également une protection active.

Toutes ces couches de protection passives sont toutefois très minces et de ce fait vulnérables à l'abrasion et aux chocs. Une fois percées, elles n'assurent plus leur rôle protecteur et, mises en contact avec l'eau, les parties de métal nues commencent à rouiller.

La *protection active* consiste à relier l'élément de construction électriquement à une *anode de protection* soit une pièce exécutée dans un métal moins noble. Ainsi une pile électrochimique est créée dans laquelle l'anode c.à.d. le métal le moins noble est oxydé progressivement mais l'élément de construction protégé.

Certains métaux se constituent aussi une *protection naturelle* contre la corrosion. Ainsi le cuivre, l'aluminium, le zinc mais aussi l'acier inox et l'acier patinable forment, au contact avec l'air ambiant et l'eau, une couche d'oxyde à leur surface. Cette couche ayant atteint une certaine épaisseur, l'oxydation s'arrête et l'élément métallique est naturellement protégé. Les aciers d'armatures sont également protégés par ce phénomène lorsqu'ils se trouvent entourés d'un milieu alcalin comme le béton non carbonaté.

Dans la modélisation, la protection active peut être prise en considération par la diminution de la vitesse de corrosion. Pour simuler une protection passive, il suffit d'ajouter une ou plusieurs couches de peinture ou autre dans la composition de la paroi.

A.1.1 Corrosion atmosphérique

La corrosion atmosphérique concerne des phénomènes qui apparaissent lorsqu'un matériau est exposé directement aux conditions atmosphériques, c.-à-d. à l'air libre. Dans le cas de métaux de construction cette situation se présente à chaque fois qu'une tôle ou qu'un profil est sans protection, en contact direct avec l'air ambiant. Dans le digest de décembre 1975, Sereda identifie les 4 facteurs influençant la corrosion atmosphérique des métaux :

- la durée d'humidité
- la pollution (concentration en SO₂)
- les sels marins (concentration en chlorures)
- la température~

³Zingage : opération qui consiste à recouvrir une tôle ou une pièce de métal d'une pellicule de zinc.

⁴Aussi appelée anodisation : par traitement dans un bain électrolytique une couche artificielle d'oxyde d'aluminium (alumine) est créée protégeant ainsi l'élément de la corrosion. Cette couche peut avoir une teinte naturelle ou être colorée.

La durée d'humidité

La durée d'humidité est le facteur le plus important pour la corrosion. Selon Sereda une humidité relative (HR) de plus de 75% à la surface du matériau est nécessaire pour induire la corrosion. Ceci peut être le cas lorsqu'il y a condensation de l'humidité ambiante à la surface ou lorsque la surface est mouillée pour d'autres raisons.

La norme ISO 9223 :1992 définit une *durée de persistance de l'humidité sur les surfaces*⁵ (τ en [h/a] ou [%]) ainsi : "Elle dépend de la relation température-humidité de l'atmosphère en air libre et de du type de l'emplacement. Elle représente la durée par année dont l'humidité relative est supérieure à 80% et la température supérieure à 0°C et s'exprime en heures par an ([h/a]) ou en pourcentage de durée de persistance de l'humidité (%)." .

Le tableau A.3 montre la classification des *durées de persistance* en 5 classes ($\tau_1 \dots \tau_5$).

Classe	Durée de persistance à l'humidité		Exemple de situation correspondante
	h/a	%	
τ_1	$\tau \leq 10$	$\tau \leq 0.1$	Microclimats intérieurs avec climatisation
τ_2	$10 < \tau \leq 250$	$0.1 \leq \tau \leq 3$	Microclimats intérieurs sans climatisation sauf espaces intérieurs non climatisés des zones climatiques humides
τ_3	$250 < \tau \leq 2500$	$3 \leq \tau \leq 30$	Atmosphères extérieures des zones climatiques sèches, froides et d'une partie des zones tempérées ; hangars convenablement ventilés dans les zones climatiques tempérées
τ_4	$2500 < \tau \leq 5500$	$30 \leq \tau \leq 60$	Atmosphères extérieures de toutes les zones climatiques (sauf sèches et froides) ; hangars ventilés en climat humide ; hangars non ventilés en climat tempéré
τ_5	$5500 < \tau$	$60 \leq \tau$	Partie des zones climatiques humides ; hangars non ventilés en climat humide

TAB. A.3 – Classification de la *durée de persistance* de l'humidité sur les surfaces
(source : ISO 9223 :1992(F), Tableau 1)

La pollution

Pour la corrosion, seul l'anhydride sulfureux (SO_2) accélère le processus de corrosion de façon prévisible. Des dépôts de particules sur une surface métallique peuvent déclencher la corrosion. La norme 9223 mesure la *pollution par les substances contenant du soufre* représenté par le dioxyde de soufre (SO_2) par la vitesse de dépôt du SO_2 en $mg/(m^2 \cdot d)$ ou par la concentration SO_2 en $\mu g/m^3$. Ces mesures permettent de déterminer les 4 catégories de pollution par le soufre ($P_0 \dots P_3$) montrées dans le tableau A.4.

Catégorie	Vitesse de dépôt du SO_2 $mg/(m^2 \cdot d)$	Concentration SO_2 $\mu g/m^3$
P_0	$P_d \leq 10$	$P_c \leq 12$
P_1	$10 < P_d \leq 35$	$12 \leq P_c \leq 40$
P_2	$35 < P_d \leq 80$	$40 \leq P_c \leq 90$
P_3	$80 < P_d \leq 200$	$90 \leq P_c \leq 250$

TAB. A.4 – Classification de la *pollution* par les substances contenant du soufre, représentées par le dioxyde de soufre (SO_2)

(source : ISO 9223 :1992(F), Tableau 2)

⁵En anglais *Time of Wetness* (TOW)

Les sels marins

Lorsque le matériau est soumis à une pulvérisation de sels marins, le processus de corrosion s'accélère de façon importante. Cependant, l'intensité de cette contrainte diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne du bord de mer. La norme ISO 9223 tient également compte de ce facteur par la mesure de la vitesse de dépôt des chlorures et la classification en 4 catégories ($S_0 \dots S_3$), voir tableau A.5).

Catégorie	Vitesse de dépôt des chlorures $mg/(m^2 \cdot d)$
S_0	$S \leq 3$
S_1	$3 < S \leq 60$
S_2	$60 < S \leq 300$
S_3	$300 < S \leq 1500$

TAB. A.5 – Classification de la pollution par le sel contenu dans l'air sous forme de chlorure (source : ISO 9223 :1992(F), Tableau 3)

La présence de sel dans l'air a également une influence sur le choix de la classe de *durée de persistance* (tableau A.3) : *”Les surfaces protégées en atmosphère maritime où peuvent se produire des dépôts de chlorures peuvent voir leurs durées de persistance de l'humidité s'accroître de façon substantielle en raison de la présence de sels hygroscopiques. Elles doivent être rangées dans la classe τ_5 .”*⁶

La température

Le processus de corrosion est ralenti pour des sites dont la température moyenne est sensiblement plus basse (p. ex. grand nord au Canada ou régions de montagnes), sinon il n'y a pas d'influence significative.

La détermination de la corrosivité de l'atmosphère pour un métal donné est fait dans la norme ISO 9223 via l'introduction des 5 classes de *corrosivité de l'atmosphère* ($C_1 \dots C_5$) montrées dans le tableau A.6. Pour chaque métal, la classe de corrosivité est déterminée à partir de la classe de *durée de persistance* (τ) ainsi que des deux catégories de pollution (soufre P et chlorures S).

Classe	Corrosivité
C1	Très faible
C2	Faible
C3	Moyenne
C4	Élevée
C5	Très élevée

TAB. A.6 – Classes de corrosivité de l'atmosphère (source ISO 9223, Tableau 4)

Pour calculer la profondeur de corrosion, la norme ISO 9224 sépare le phénomène de corrosion en deux phases. Les premiers dix ans d'exposition atmosphériques, la profondeur de corrosion augmente à la vitesse moyenne r_{av}

$$\Delta h_1 = r_{av} \cdot (t_1 - t_0) \quad (A.1)$$

avec

Δh_1 est la profondeur de corrosion en micromètres (μm), des 10 premières années d'exposition ;

r_{av} est la vitesse de corrosion moyenne sur les 10 premières années d'exposition atmosphérique ;

t_0 est l'instant où commence l'exposition ;

t_1 est l'instant où s'arrête l'exposition ;

⁶De ISO 9223-F (1992), note 4 du tableau 1

Au bout de dix ans d'exposition, le phénomène se stabilise et la corrosion augmente à la *vitesse stabilisée de corrosion* r_{lin}

$$\Delta h_2 = r_{lin} \cdot (t_2 - t_1) \quad (A.2)$$

La profondeur totale de corrosion (h) se calcule alors comme suit :

$$\begin{cases} t < 10 \text{ ans} : & h = r_{av} \cdot t \\ t > 10 \text{ ans} : & h = r_{av} \cdot 10 + r_{lin} \cdot (t - 10) \end{cases} \quad (A.3)$$

avec

h : profondeur totale de corrosion

t : durée totale de la corrosion atmosphérique en [ans]

Classe de corrosivité	Métal	Acier au carbone	Acier patinable	Zinc	Cuivre	Aluminium
C1	r_{av}	≤ 0.5	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.01	≈ 0.01
	r_{lin}	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.05	≤ 0.01	négl.
C2	r_{av}	0.5..5	0.1..2	0.1..0.5	0.01..0.1	≤ 0.7025
	r_{lin}	0.1..1.5	0.1..1	0.05..0.5	0.01..0.1	0.01..0.2
C3	r_{av}	5..12	2..8	0.5..2	0.1..1.5	0.025..0.2
	r_{lin}	1.5..6	1..5	0.5..2	0.1..1	0.02..0.2
C4	r_{av}	12..30	8..15	2..4	1.5..3	note 5
	r_{lin}	6..20	5..10	2..4	1..3	note 5
C5	r_{av}	30..100	15..80	4..10	3..5	note 5
	r_{lin}	20..90	10..80	4..10	3..5	note 5

note 5 : Dans les atmosphères définies par les classes de corrosivité C 4 et C 5, on peut s'attendre à une augmentation marquée de la vitesse de corrosion et les effets de corrosion localisée deviennent importants. Dans ces deux classes de corrosivité, les données relatives à la corrosion généralisée peuvent induire en erreur.

TAB. A.7 – Valeurs de référence pour les vitesses de corrosion (r_{av} , r_{lin}) de l'acier au carbone, des aciers patinables, du zinc, du cuivre et de l'aluminium dans des atmosphères de différentes classes de corrosivité (source : norme ISO 9224, 1992, tableau 1)

Le tableau A.7 indique les valeurs de référence pour les vitesses de corrosion (r_{av} et r_{lin}) de différents métaux selon la norme ISO 9224 (1992).

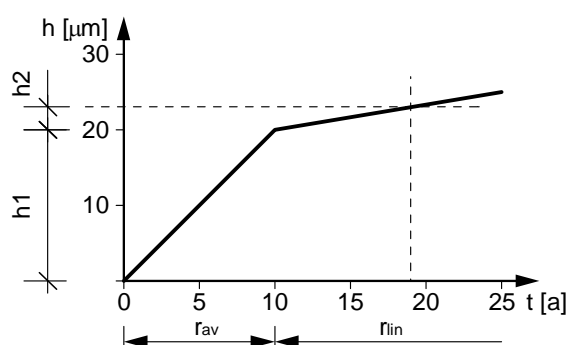


FIG. A.2 – Evolution de la profondeur de corrosion selon la norme ISO 9224 (1992)

La figure A.2 illustre l'évolution de la profondeur de corrosion calculée selon cette méthode.

A.1.2 Métaux ferreux (Aciers)

L'acier est le métal le plus utilisé dans le domaine de la construction. Par son prix de production relativement bas, sa résistance élevée ainsi que la multitude de formes qu'il peut adopter, l'acier est utilisé dans presque tous les domaines de la construction. Ceci en tant qu' :

- élément *structurel* sous forme de profilés, de barres d'armatures, de tôles nervurées ou de câbles, seul ou en combinaison avec d'autres matériaux tels que le béton ou le bois ;
- élément de *revêtement* sous forme de tôles ou de mailles ;
- élément de *liaison* en combinaison avec le bois (ferments, éléments d'assemblage pour charpentes) ;
- élément d'*installation* sous forme de tuyaux de chauffage, ventilation ou sanitaire ;
- élément de *ferblanterie* ;
- élément ponctuel de *fixation*.

Pathologies

Les principales pathologies de l'acier sont dues à sa vulnérabilité à la corrosion. Pour assurer leur durabilité, les aciers exposés aux intempéries, doivent toujours être protégés contre la corrosion (voir paragraphe A.1).

Actuellement, deux formes d'acier sont modélisées, les tôles en acier doux et les barres d'armatures pour les bétons armés.

Tôles d'acier doux

Le matériau *Tôle d'acier brut* regroupe les tôles en acier doux sans revêtement de protection. Ces tôles sont utilisées dans la construction comme revêtement de façade et de toiture. En combinaison avec des isolants, sous forme de panneaux sandwich, ils peuvent constituer des éléments de façade entiers. On les trouve sur le marché sous forme plane, nervurée, profilée ou ondulée. Elles peuvent également être pleines ou perforées. Pour la modélisation nous distinguons également entre trois types de joints : les joints ouverts, les joints à recouvrement et les joints soudés.

Comme mentionné plus haut, pour assurer leur durabilité dans le temps, les tôles doivent toujours être protégées contre la corrosion par des revêtements galvaniques et/ou des peintures. Dans la simulation, la tôle est à considérer étant brute et les traitements sont à modélisés par l'ajout de couches séparées.

Variantes

Pour la modélisation des tôles d'acier doux, l'intégration de plusieurs types de tôles a été prévue.

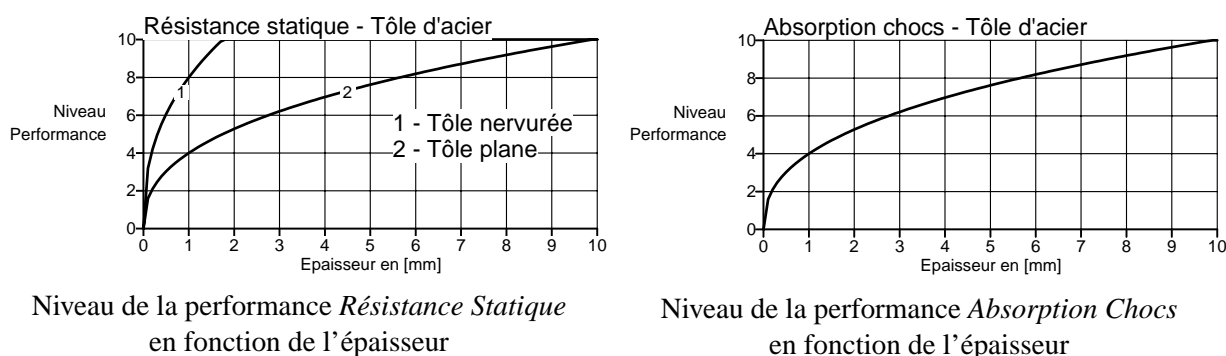


FIG. A.3 – Les performances *Résistance Statique* et *Absorption de Chocs* sont déterminées par l'épaisseur de la couche

La première distinction se fait entre des tôles planes et des tôles nervurées ou ondulées tandis que la deuxième distinction se fait entre les tôles pleines et les tôles perforées. Une troisième distinction se fait d'après le type de joint.

Les conditions d'initialisation des performances sont :

Performance	Unité	Valeurs											
		Plein						Perforé					
		Plat			Nervure			Plat			Nervure		
		O	R	S	O	R	S	O	R	S	O	R	S
Epaisseur	mm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
λ_{th}	[W/m ² K]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
λ_{vap}	[mg/h m Pa]	1.56	100	10 ⁹	1.56	100	10 ⁹	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
Etanch. Eau	0..10	1	7	10	1	7	10	1	1	1	1	1	1
Etanch. Air	0..10	2	6	10	2	6	10	2	2	2	2	2	2
Etanch. Lumière	0..10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5	5
Etanch. CO ₂	0..10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Res. Statique	0..10	f(ép)											
Res. Corrosion	0..10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Res. Usure	-10..10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Res. Délavage	-10..10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Res. Chocs	0..10	5	5	5	8	8	8	5	5	5	8	8	8
Res. Poinçonnement	0..10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Absorption Chocs	0..10	f(ép)											
Aspect	0..10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Etat de surface	0..10	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

O : joints ouverts, R : joints à recouvrement, S : joints scellés

Acier d'armature

Aciers d'armatures enrobés de béton

Etant entouré d'un milieu alcalin, ces aciers s'auto protègent par la formation d'une couche de passivation. Tant que le pH du béton est maintenu en dessus de 10, ces fers restent protégés. Si le pH est modifié, p.ex. par la carbonatation des liants hydrauliques, le film de passivation disparaît et les fers d'armatures peuvent se corroder lorsque les conditions électrolytiques sont réunies.

Performances initiales

Performance	unité	Valeur	Remarques
Ep. référence	[mm]	15	
λ_{th}	[W/m ² K]		
λ_{vap}	[mg/h m Pa]	0.64	
Etanch. Eau	0..10	0	aucune étanchéité
Etanch. Air	0..10	0	aucune étanchéité
Etanch. Lumière	0..10	0	aucune étanchéité
Etanch. CO ₂	0..10	0	aucune étanchéité
Res. Statique	0..10	f(ép.)	
Res. Corrosion	0..10	2	
Res. Usure	-10..10	10	insensible
Res. Délavage	-10..10	10	insensible
Res. Chocs	0..10	10	insensible
Res. Poinçonnement	0..10	10	insensible
Absorption Chocs	0..10	0	transmet tous les chocs car discontinu
Aspect	0..10	5	moyen
Etat de surface	0..10	8	métal brut

Pour les aciers d'armatures sont uniquement pris en compte les phénomènes de corrosion qui sont conditionnés par une valeur-pH < à 10. La variation de l'épaisseur ΔP_{max} pour une contrainte *Mouillage* maximale est estimé à 0.25[mm/a].

Corrosion des fers d'armature

Dans le béton, les armatures d'acier sont au contact avec le liquide interstitiel contenu dans les pores du béton. Ce liquide, dont le pH est entre 12.5 et 13.5, provoque à la surface des fers d'armature la formation d'une couche protectrice stable et non expansive sous forme d'oxyde de fer (Fe_3O_4). Cette formation

s'arrête au moment où cette dernière atteint une certaine épaisseur, l'acier est passivé.

Lorsque le front de carbonatation atteint les fers d'armature, l'alcalinité du milieu d'enrobage de l'acier diminue (pH 9) et l'effet protecteur est perdu, l'acier est dépassivé.

En présence d'eau et d'oxygène, la réaction électrochimique de la corrosion provoque la formation de la rouille. Cette réaction ne s'arrêtera pas tant qu'il y a apport d'eau et d'oxygène.

La rouille (hydroxyde ferrique - $Fe(OH)_2$ et hydroxyde ferrique ($Fe(OH)_3$)) occupe un volume env. 6 - 8 fois supérieur à celui de l'acier ce qui provoque d'importantes forces expansion sur le béton qui font en général éclater les parties recouvrant les fers.

La transformation de l'acier en rouille diminue également la résistance statique des fers d'armatures.

Un autre phénomène de corrosion peut également causer des désordres sur les armatures du béton. Lorsqu'il y a la présence de chlorures comme on les retrouve dans les régions côtières ou lors de la salaison des routes en hiver et que des anions agressifs (Cl^-) atteignent les fers d'armature à travers de fissures ou par diffusion, la couche passive est détruite localement et l'acier corrode en profondeur. On parle alors de corrosion par piqûres.

A.2 Mortiers hydrauliques

Les mortiers sont des réunions constituées de plusieurs éléments formant une pâte pouvant être appliquée à la truelle ou avec d'autres outils de projection sur des surfaces verticales ou horizontales. L'ossature ou le squelette du mélange est généralement formée de sables, granulats ou fillers inertes. Pour lier l'ossature, on utilise généralement des chaux aériennes ou des chaux hydrauliques ainsi que des liants synthétiques. Divers autres ajouts peuvent également être employés pour ajuster certaines caractéristiques tel que p.ex. la teinte.

Le mortier, appliqué sur des murs en maçonnerie, constitue une couche mettant le mur à l'abri des intempéries.

Utilisation

En tant que couches continues, les mortiers sont utilisés en tant que :

- revêtements de maçonneries diverses,
- couches de nivellement des dalles,
- chapes flottantes et
- couches de rhabillage, d'égalisation ou de nivellement.

Ils sont également utilisés dans les murs maçonnés pour lier les briques ou les pierres. Ces cas sont traités directement dans les matériaux correspondants.

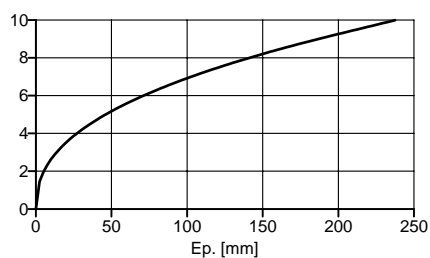
Pour la modélisation, nous distinguons entre trois types de mortier d'après leur liant :

- le *mortier de chaux* dont le liant est la chaux hydraulique,
- le *mortier de ciment* lié au ciment portland ainsi que
- le *mortier bâtard* dont le liant est un mélange de chaux et de ciment.

Performances

Les valeurs initiales des performances du modèle sont :

Performance	Unité	Valeurs		Remarques
		M Ciment	M. Chaux	
Ep. référence	[mm]	15		
λ_{th}	[W/m ² K]	0.75		
λ_{vap}	[mg/h m Pa]	0.03		
Etanch. Eau	0..10	6		Mat. poreux résistant à l'eau par pluie battante
Etanch. Air	0..10	9		Mat. étanche à l'air
Etanch. Lumière	0..10	10		Mat. complètement opaque
Etanch. CO ₂	0..10	10		
Rés. Statique	0..10	f(ép)		Déterminée par l'épaisseur (voir fig A.4)
Rés. Usure	-10..10	0	-0.5	Abrasion 1mm/a pour contrainte maximale
Rés. Délavage	-10..10	10	-1	M. Ciment très résistant au délavage
Rés. Chocs	0..10	5		
Rés. Poinçonnement	0..10	7		
Absorption de chocs	0..10	f(ép)		Déterminé par l'épaisseur (voir fig A.4)
Aspect	0..10	7		Aspect de finition des enduits
Etat de surface	0..10	5		Certaine rugosité résiduelle



Niveau de la performance *Résistance Statique*
en fonction de l'épaisseur



Niveau de la performance *Absorption Chocs*
en fonction de l'épaisseur

FIG. A.4 – Les performances *Résistance Statique* et *Absorption de Chocs* sont déterminés par l'épaisseur de la couche

Variation de performances

Les pathologies, dont le modèle tient compte, sont les suivantes :

Phénomène	Performance	Contrainte	dPmax	Type de dégradation
Diminution d'épaisseur par Usure mécanique	Epaisseur	Usure	V. Usure	Abrasion mécanique
Diminution d'épaisseur par Délavage	Epaisseur	Délavage	V. Délavage	Délavage
Diminution de l'étanchéité à l'eau par des chocs	Etanch. Eau	Chocs	0.2	Fissuration
Diminution de la résistance à l'usure à l'apparition de gel	Res. Usure	Gel	0.2	Fragilisation, éclatement
Modification de l'aspect par l'usure mécanique	Aspect	Usure	0.5	Traces d'usure
Diminution de l'aspect du à des chocs	Aspect	Chocs	0.3	Traces de chocs
Modification de l'aspect lorsque exposé à l'eau	Aspect	Mouillage	0.1	Flore
Modification de l'aspect lorsque exposé à des polluants	Aspect	Polluants	0.5	Salissures
Altération de la planéité de surface par l'usure mécanique	Etat	Usure	1	Traces d'usure
Modification de la conductibilité thermique due à des infiltrations d'eau	λ_{th}	TOW	-0.75	Absorption d'eau
Diminution de l'étanchéité à la vapeur par des chocs	λ_{vap}	Chocs	-0.01	Fissuration

A.3 Terres cuites

Deux matériaux de terre cuite sont décrits, les briques de terre cuite et les tuiles de terre cuite.

A.3.1 Briques de terre cuite

La brique de terre cuite est utilisée pour la construction de murs en maçonneries ou des dalles à hourdis.

Variantes

On trouve sur le marché différentes formes et types de briques de terre cuite qui n'ont pas toutes des caractéristiques identiques. Pour tenir compte de ces spécificités, les performances initiales sont définies en fonction du type de brique. Dans la modélisation, on distingue entre les briques *pleines*, les briques *perforées*, les briques *cellulaires*, les briques *creuses* et les briques *pleines de parement*.

Performances

Les performances des objets Brique de terre cuite sont initialisées avec les valeurs suivantes :

Performance	Unité	Pleine	Perforée	Cellulaire	Creuse	Parement	Remarques
Ep. référence	[mm]	150					
λ_{th}	[W/m ² K]	0.52	0.45	0.42	0.80	0.11	
λ_{vap}	[mg/h m Pa]	0.10	0.15	0.30	0.08	0.64/3	
Etanch. Eau	0..10	3					Conduit l'eau par capillarité
Etanch. Air	0..10	9					Bonne étanche à l'air
Etanch. Lumière	0..10	10					Mat. complètement opaque
Etanch. CO ₂	0..10	10					
Res. Statique	0..10	P(ép.)					Déterminée par l'épaisseur
Res. Corrosion	0..10	10					Insensible à la corrosion
Res. Usure	-10..10	6	6	6	6	8	
Res. Délavage	-10..10	10					Insensible au délavage
Res. Chocs	0..10	6					
Res. Poinçonnement	0..10	7					
Absorption Chocs	0..10	10					Indéformable
Aspect	0..10	6	6	6	6	8	Normalement revetu d'un enduit (sauf brique de parement)
Etat de surface	0..10	4	4	4	4	6	

Pathologies

La porosité du matériau permet l'infiltration et la progression de l'eau par capillarité. Le mouillage provoque une diminution de la résistivité thermique ainsi que, en combinaison avec des températures en dessous de 0°C de la desquamation dû au gel.

Variation Performances

Phénomène	Performance	Contrainte	ΔP_{max}	Type de dégradation
Diminution d'épaisseur par Usure mécanique	Epaisseur	Usure	V. Usure	Abrasion mécanique
Modification de l'aspect par l'usure mécanique	Aspect	Usure	0.25	Traces d'usure
Altération de la surface par l'usure mécanique	Etat de surface	Usure	0.2	Traces d'usure
Modification de l'aspect par Poinçonnement	Aspect	Poinçonnement	0.25	éclatement
Modification de l'état de surface par Poinçonnement	Etat de surface	Poinçonnement	0.2	éclatement
Modification de l'aspect lorsque exposé à des polluants	Aspect	Polluants	0.5	Salissures
Modification de l'aspect par l'usure mécanique	Aspect	Usure	1	Traces d'usure
Altération de la surface par l'usure mécanique	Etat de surface	Usure	1	Traces d'usure

Phénomène	Performance	Contrainte	ΔP_{max}	Type de dégradation
Modification de l'aspect par Poinçonnement	Aspect	Poinçonnement	1	éclatement
Modification de l'état de surface par Poinçonnement	Etat de surface	Poinçonnement	1	éclatement
Modification de l'aspect lorsque exposé à des polluants	Aspect	Polluants	1	Salissures
Diminution de la résistance à l'usure à l'apparition de gel	Res. Usure	Gel	0.2	Fragilisation, éclatement
Modification de la conductibilité thermique due à des infiltrations d'eau	λ_{th}	Mouillage	-0.08..-0.2	Absorption d'eau

A.3.2 Tuiles de terre cuite

La tuile de terre cuite est utilisée comme revêtement de toiture ou parfois de façade.

Performances

Constituant la principale couche d'étanchéité à l'eau d'une toiture, les tuiles sont posées en écailles et l'étanchéité est créée par le recouvrement des tuiles. Ainsi l'eau de précipitations peut ruisseler par gravité d'une tuile à l'autre avant d'atteindre le bord de toiture. L'étanchéité est assurée à condition que la pente soit suffisante pour empêcher des remontées d'eau entre les tuiles adjacentes même en cas de neige ou lors de pluies battantes. La performance *Etanchéité à l'eau* d'une couche de tuiles dépend donc essentiellement de la pente du composant. Dans une moindre mesure elle dépend de la nature des tuiles. La figure A.5 illustre la relation entre la pente et la performance *Etanchéité à l'eau* utilisée dans la simulation.

Les valeurs d'initialisation des performances sont :

Performance	unité	Valeur	Remarques
Ep. référence	[mm]	12	
λ_{th}	[W/m ² K]	0.6	
λ_{vap}	[mg/h m Pa]	0.64	
Etanch. Eau	0..10	P(pente, type)	
Etanch. Air	0..10	4	
Etanch. Lumière	0..10	8	
Etanch. CO ₂	0..10	0	
Res. Statique	0..10	4	
Res. Corrosion	0..10	10	Insensible à la corrosion
Res. Usure	-10..10	10	Surface très dur
Res. Délavage	-10..10	10	Insensible au délavage
Res. Chocs	0..10	4	
Res. Poinçonnement	0..10	10	Très dur
Absorption Chocs	0..10	10	Indéformable
Aspect	0..10	7	
Etat de surface	0..10	5	

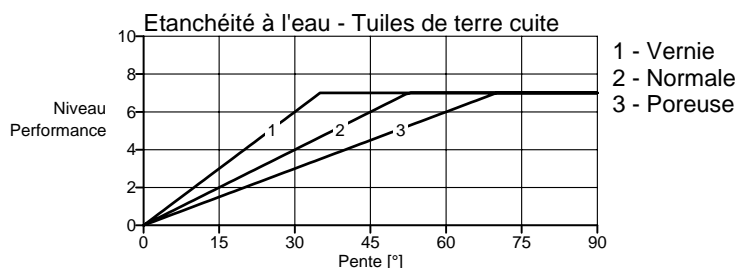


FIG. A.5 – Niveau de la performance *Etanchéité à l'eau* en fonction de la pente pour différents types de tuiles

Variation Performances

Phénomène	Performance	Contrainte	ΔP_{max}	Type de dégradation
Diminution de l'étanchéité à l'air par des Chocs	Etanch. Air	Chocs	0.56	Fissuration
Diminution de l'étanchéité à l'eau par des chocs	Etanch. Eau	Chocs	2.5	Fissuration
Diminution de l'aspect dû à des chocs	Aspect	Chocs	2.2	Traces de chocs

A.4 Bois

La famille des ligneux regroupe tous les bois massifs de la construction. Pour l'instant 3 types de bois massifs ont été modélisés : les *bois résineux tendres*, les *bois feuillus durs* et les *lattage de bois*. Les deux premiers sont des couches plus ou moins continues, constituées de planches et utilisées pour faire des bardages, des lambrissages, des planchers etc. Le lattage de bois représente des couches de bois discontinues utilisées pour des sous-constructions, des solivages ou des chevonnages. Bien que constitué également de bois résineux ou feuillus, le lattage doit être traité à part car ses performances initiales divergent fondamentalement des couches continues.

A.4.1 Couches de bois continues

Bois résineux tendres

Les bois caractéristiques de cette classe sont le sapin, le pin, l'épicéa et le mélèze. L'utilisation de ces bois dans la construction est très répandue car ils sont disponibles en quantité et faciles à travailler. Ils sont principalement utilisés pour des planchers, des revêtements de façades, des finitions intérieures et parfois même comme revêtement de sol.

Bois feuillus durs

Les bois caractéristiques de cette classe sont le chêne, le hêtre, le châtaigner, l'érable et le noyer. Etant moins cultivés que les résineux et plus durs à travailler, mais présentant une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure, ces bois sont utilisés pour des applications spécifiques telles que les revêtements de sol, les panneaux de portes, les plans de travail et le mobilier.

Pathologies

Les bois massifs étant des matériaux organiques composés de cellulose et de lignine, ils sont sensibles à différents types de contraintes, notamment au mouillage, à la lumière, aux contraintes mécaniques ainsi qu'à la température et à l'humidité. Les pathologies principales sont :

- La *dilatation et le retrait hydrique* dus à la variation du taux d'humidité du bois peut provoquer le voilement ou l'ouverture des assemblages. Cette dilatation est dans le sens radial entre 0.1 et 0.3 % par % de changement du taux d'humidité. Dans le sens tangentiel, cette valeur varie entre 0.2 et 0.4 [% / %]⁷. Ce type de pathologie apparaît lorsque le bois est en contact direct de l'eau de pluie, de condensation, de lavage, du sol etc. Il apparaît également lorsque l'humidité relative varie au cours des saisons.
- La *dilatation et le retrait thermique* apparaissent lorsque le bois est exposé directement au rayonnement solaire et peuvent provoquer le voilement ou l'ouverture des assemblages. Pour éviter ces désordres, il est conseillé de couvrir les matériaux avec des peintures de couleur claire.
- Comme tous les matériaux organiques, les bois sont également soumis à la *photo-dégradation* lorsqu'ils sont soumis à la lumière solaire. Ce phénomène se manifeste par la décoloration de la surface.
- La dégradation par la *pourriture* du bois se déclenche lorsqu'il est attaqué par les champignons dans des conditions assez spéciales d'humidité et de température. Baker (1972) cite les facteurs qui influencent cette pathologie :
 1. *Source d'infection* : Les spores se véhiculant dans l'air, les conditions d'infection sont toujours remplies.
 2. *Support favorable* : Le bois constitue un support favorable à la croissance des champignons ; d'autre part, la cellulose, la lignine et d'autres constituants des parois des cellules et des tissus du bois leur procurent une nourriture appropriée.

⁷Hegger et al. (2005), p.68

3. *Quantité suffisante d'humidité* : L'humidité doit être suffisante pour la germination des spores et la croissance des champignons. Le taux d'humidité optimum pour le développement des champignons se situe entre 25 et 60% d'humidité de masse. En dessous de 20% le champignon cesse de se développer.⁸

4. *Air - Oxygène* : Tout champignon destructeur du bois a besoin d'air pour croître, et plusieurs espèces meurent rapidement si elles en sont privées

5. *Température favorable* : Les champignons se développent dans une fourchette de température comprise entre 3° et 40°C avec une fourchette très favorable entre 20 et 30 °C, ce qui explique les dégâts dans les toitures. La mérule se développe le mieux entre 18 et 22°C ce qui explique son apparition plutôt dans les caves, plus fraîches.⁹

6. *Autres facteurs* : Parmi ces facteurs on peut citer la lumière qui a un effet retardataire sur le développement du mycélium.

- Les bois peuvent aussi être *attaqués par des insectes*. Comme pour les champignons, ils fournissent un substrat de nourriture et un habitat idéal pour certaines espèces. Selon Graf (1995), le capricorne, le lyctus ou la petite vrillette ont chacun leurs préférences pour certaines essences de bois et se développent à partir des taux d'humidité entre 8% et 13% .

Performances

Pour obtenir des couches continues en bois naturel, la mise en oeuvre sur le chantier se fait toujours par un montage de planches qui peuvent avoir des détails d'assemblage variés. A l'instar des tôles métalliques, les performances de ces couches dépendent en partie de la manière dont les planches sont mises ensemble, c.-à-d. la nature des joints. C'est pourquoi les modèles peuvent traiter 3 types de joints : les joints ouverts (O), les joints à recouvrement (R) et les joints scellés (S).

Une éventuelle application de traitements biocides peut influencer les résistances à la pourriture et aux attaques par des insectes. Pour tenir compte de ce facteur le modèle peut traiter trois situations : *sans* traitement, avec traitement *superficiel* et avec traitement en *profondeur*.

Le tableau suivant montre les différentes valeurs initiales des performances pour les *bois résineux tendres* ainsi que pour les *bois feuillus denses* :

Performance	Unité	Résineux			Bois dur			Remarques
		O	R	S	O	R	S	
Ep. référence	[mm]	15						
λ_{th}	[W/m²K]	0.14			0.2			
λ_{vap}	[mg/h m Pa]	0.64	0.1	0.02	0.64	0.1	0.02	
Etanch. Eau	0..10	f(P)	f(P)	10	f(P)	F(P)	10	
Etanch. Air	0..10	4	6	10	4	6	10	
Etanch. Lumière	0..10	10						Mat. complètement opaque
Etanch. CO ₂	0..10	10						
Rés. Statique	0..10	f(ép.)						
Rés. Corrosion	0..10	10						
Rés. Usure	-10..10	10						
Rés. Délavage	-10..10	-2.3			0			
Rés. Chocs	0..10	8						
Rés. Poinçonnement	0..10	5			6			
Absorption Chocs	0..10	f(ép.)						
Aspect	0..10	8			10			
Etat surface	0..10	7			9			

O : joints ouverts - R : joints à recouvrement - S : joints scellés - f(P) : f(pente)

⁸Graf, 1995

⁹Idem

Les variations de performances des deux classes sont les suivantes :

Phénomène	Performance	Contrainte	ΔP_{max}						Type de dégradation
			Résineux			Bois dur			
			I	II	III	I	II	III	
Diminution d'épaisseur par Usure mécanique	Epaisseur	Usure	V. Usure						Abrasion mécanique
Modification de l'aspect par l'usure mécanique	Aspect	Usure	1.5			0.6			Traces d'usure
Altération de la surface par l'usure mécanique	Etat surface	Usure	1.5			0.2			Traces d'usure
Diminution d'épaisseur par Délavage	Epaisseur	Délavage	V. Délavage						Dissolution de la lignine
Diminution de l'aspect dû à des chocs	Aspect	Chocs	0.4			0.25			Traces de chocs
Déformation de la surface par des chocs	Etat surface	Chocs	0.3						Déformation
Modification de l'aspect par Poinçonnement	Aspect	Poinçon- nement	0.6			0.3			Ecrasement
Modification de l'état de surface par Poinçonnement	Etat surface	Poinçon- nement	0.3			0.2			Ecrasement
Modification de l'aspect lorsque exposé à des polluants	Aspect	Polluants	1						Salissures
Modification de l'aspect par exposition à la lumière	Aspect	Soleil	1						Dépoly- mérisation
Perte d'épaisseur par pour- riture	Epaisseur	Pourriture	$\frac{EO}{2}$	$\frac{EO}{10}$	$\frac{EO}{30}$	$\frac{EO}{10}$	$\frac{EO}{30}$	$\frac{EO}{60}$	Pourriture
Modification de l'aspect par Pourriture	Aspect	Pourriture	3.5	0.7	0.23	0.9	0.3	0.15	Pourriture
Altération de la surface par Pourriture	Etat surface	Pourriture	3	0.6	0.2	0.8	0.27	0.13	Pourriture
Perte de dureté par Pourri- ture	Res. Poinçon- nement	Pourriture	2	0.4	0.13	0.5	0.17	0.083	Pourriture
Modification de la conduc- tibilité thermique due à la pourriture	λ_{th}	Pourriture	k	$\frac{k}{10}$	$\frac{k}{30}$	$\frac{k}{10}$	$\frac{k}{30}$	$\frac{k}{60}$	Pourriture

EO : Epaisseur originale - I : sans traitement - II : traitement superficiel - III : traitement profond

A.4.2 Lattage de bois

Etant la plupart du temps constitué de bois résineux tendre, le lattage de bois a également les pathologies décrites au paragraphe précédent.

Les valeurs d'initialisation des performances sont :

Performance	Unité	Valeur	Remarques
Ep. référence	[mm]	60	
λ_{th}	[W/m ² K]	200	
λ_{vap}	[mg/h m Pa]	1E+11	
Etanch. Eau	0..10	0	aucune étanchéité
Etanch. Air	0..10	0	aucune étanchéité
Etanch. Lumière	0..10	1	fraction de cadre env. 10%
Etanch. CO ₂	0..10	0	aucune étanchéité
Rés. Statique	0..10	0.12·ép.	
Rés. Corrosion	0..10	10	insensible
Rés. Usure	-10..10	-10	
Rés. Délavage	-10..10	-10	
Rés. Chocs	0..10	0	
Rés. Poinçonnement	0..10	0	

Performance	Unité	Valeur	Remarques
Absorption Chocs	0..10	0	transmet tous les chocs
Aspect	0..10	5	moyen
Etat surface	0..10	0	est discontinu

Les paramètres de variation de performance du lattage de bois sont les suivants :

Phénomène	Performance	Contrainte	ΔP_{max}	Type de dégradation
Diminution d'épaisseur par Délavage	Epaisseur	Délavage	V. Délavage	Abrasion par délavage
Perte d'épaisseur par pourriture	Epaisseur	Pourriture	20	Pourriture
Modification de l'aspect par Pourriture	Aspect	Pourriture	0.5	Pourriture

A.5 Peintures

Dans la famille de peintures sont regroupés les matériaux filmogènes synthétiques comme les peintures, les glaces, les vernis et les enduits de résine. Ces matériaux organiques sont utilisés comme couche de finition. Appliqués sur d'autres matériaux, ils déterminent l'aspect et la couleur de l'élément de construction. Souvent, ils ont également une fonction protectrice pour les couches qu'ils recouvrent. Ainsi elles protègent les aciers contre la rouille, les bois contre la formation de microorganismes, les bétons contre une carbonatation trop rapide etc.

D'un point de vue chimique, les filmogènes sont des matériaux composites constitués de trois ou quatre composants soit d'un *liant*, d'un *solvant*, de *pigments* et éventuellement de *charges*. A l'état liquide ou pâteux, ils sont appliqués sur la couche support. Une fois en place, le solvant s'évapore et le liant durcit. Le matériau fini forme un film mince qui tient par adhérence sur son matériau support. Le liant forme la structure du feuil durci alors que les pigments déterminent sa couleur. Les charges, constitués par des farines inertes, peuvent servir à renforcer la résistance ou à augmenter le volume. Les propriétés du film ainsi que sa sensibilité aux agents extérieurs dépendent d'un ou plusieurs des composants. La figure A.6 montre les composants ainsi que le passage de l'état liquide à l'état filmogène.

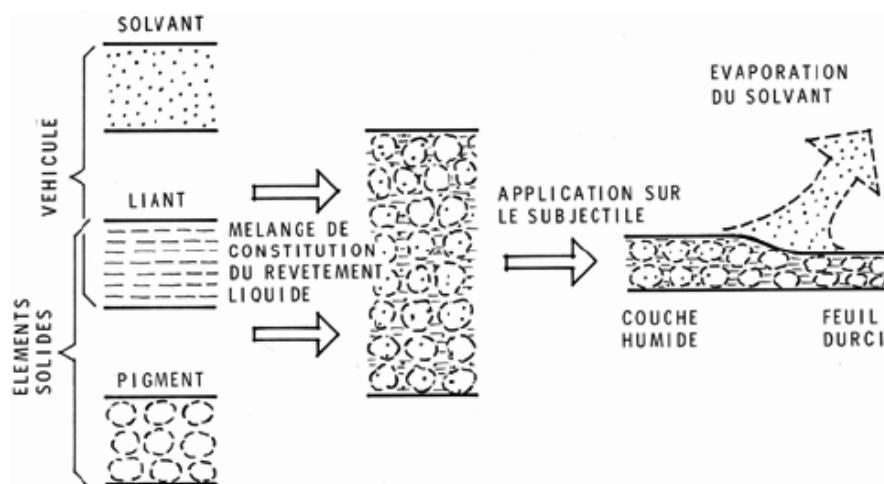


FIG. A.6 – Composition générale des revêtements à liquide pigmenté et mode de formation du feuil
(source : Ashton, 1967)

Performances

Les deux principales performances requises sont l'aspect ainsi que l'étanchéité à l'eau. La première, l'aspect, car les peintures ont souvent un rôle de finition. La deuxième, l'étanchéité à l'eau, pour assurer leur fonction protectrice et pour éviter le décollement prématuré de leur support. Ceci car l'infiltration d'eau entre le film et le matériaux support a souvent des conséquences fatales.

Le fait que ces matériaux soient minces et qu'ils adhèrent au matériau support conditionne une partie de leurs performances. Ils subissent toutes les déformations de leur support comme ils transmettent les actions d'impact directement plus loin. Ainsi leur comportement face aux contraintes dépend également des caractéristiques du support.

Pathologies courantes

Les principales pathologies sont :

L'usure : Bien qu'elles aient des duretés similaires de ceux de thermoplastiques, les filmogènes constituent des couches très minces (<1mm) qui s'usent rapidement.

La perte d'étanchéité : Les impacts mous n'affectent pas l'intégrité du filmogène tant que celui-ci est appliqué sur un support résistant et dur. Sur des supports mous par contre, la déformation due à un choc peut générer des efforts de traction au-delà de la limite de rupture du film et provoquer son déchirement. Ceci est valable aussi pour des retraites du support, provoqués pour d'autres raisons comme les variations de température ou hygrométriques. Leur faible épaisseur les rend également vulnérables au poinçonnement qui peut provoquer des percements ponctuels.

La perte d'adhérence : La perte d'adhérence est souvent une conséquence de la perte d'étanchéité. Ceci car des films percés ouvrent à l'eau la possibilité de s'infiltrer. Emprisonnée entre deux couches, elle ne peut s'évaporer et stagne. Lors d'augmentations de températures elle s'évapore et exerce des pressions sur la couche la plus faible. Son infiltration peut aussi provoquer des désordres du matériau support comme la corrosion ou la pourriture. Dans tous ces cas on observe, entre autre, une perte d'adhérence et un décollement local du film.

La photo-dégradation : Dans les peintures synthétiques, les liants sont des matériaux organiques. Soumis au rayonnement solaire, elles peuvent se fariner¹⁰ Ceci car la radiation UV provoque la décomposition du liant par destruction des chaînes moléculaires. Les autres parties, les pigments et d'éventuelles charges, ne sont alors plus tenu ensemble et restent comme une poudre fine à la surface.

Classes-Filmogènes

Pour la simulation, 7 types de filmogènes ont été modélisés :

Peinture dispersion

Peinture à base de résines alkydes en dispersion aqueuse, d'aspect mate, de coloris pastel et peu résistante à l'usure. La plupart des peintures utilisées dans le bâtiment sur des murs ou des plafonds sont des dispersions.

Peinture émail ou à l'huile

Peinture brillante, à forte teneur en liants synthétiques ou naturels. Utilisée sur des menuiseries ou dans des locaux humides car résistante et facilement lavable.

Peinture époxyde

Peinture avec un liant époxyde à deux composants, très résistante, utilisée à des endroits fortement sollicités ou pour protéger des métaux.

Enduit de résine époxyde

Couche plus épaisse liés également avec une résine époxyde. Utilisée en tant que couche d'usure pour les sols et les surfaces exposées à l'usure.

Glacis de protection du bois

Imprégnation ou "peinture non couvrante" pour le bois

Peinture de fond sur métal

Peinture contenant des substances pour une protection passive contre la corrosion, généralement utilisée comme couche de fond directement sur le métal et recouvert par une autre peinture.

Peinture par thermo-laquage

Peinture très résistante dont le liant doit être chauffé pour durcir. S'applique sur des tôles en acier ou en aluminium. Uniquement pour des pièces fabriquées et peintes en atelier.

¹⁰Farinage : voir chapitre 5.7 - Contraintes lumière

Les conditions d'initialisation des performances sont :

Performance	Unité	Valeurs							Remarques
		Dispersion	Peinture émail	Peinture époxy	Enduit époxy	Glacis de protection	Couche de fond pour métaux	Thermolaquage	
Rés. Usure	-10..10	2	4.5	8.5	9	4	4	8	
Rés. Délavage	-10..10	4.3	5	8.5	9	4	4	8	
Abs. Chocs	0..10	0	0	0	2*k	0	0	0	Etant des filmogènes, les chocs sont transmises sans modification à la couche suivante
Rés. Stat.	0..10	1	1	1	2	1	1	1	Etant des filmogènes, la résistance statique très mauvais
Rés. Chocs	0..10	1	1	1	6	1	1	6	
Rés. Poinçonnement	0..10	5	5	5	5	5	5	9	
Rés. Corrosion	0..10	10	10	10	10	10	10	10	Etant des matières synthétiques, toutes les peintures résistent très bien à la corrosion
Etanch. à l'Eau	0..10	7	8	8	8	4	5	8	
Etanch. à l'Air	0..10	10	9	9	10	2	9	10	
Etanch. CO ₂	0..10	10	10	10	10	10	10	10	
Etanch à la Lumière	0..10	10	10	10	10	9	10	10	
Aspect	0..10	8	8	9	9	8	6	9	toutes les peintures utilisés comme couches de finition ont des performances Aspect élevés
Poli	0..10	9	9	10	10	8	8	10	

Les paramètres de variation de performance des filmogènes sont les suivants :

Phénomène	Performance	Contrainte	ΔP_{max}							Type de dégradation
			Dispersion	Peinture émail	Peinture époxy	Enduit époxy	Glacis de protection	Couche de fond pour métaux	Thermolaquage	
Diminution d'épaisseur par Usure mécanique	Epaisseur	Usure	V. Usure							Abrasion mécanique
Modification de l'aspect par l'usure mécanique	Aspect	Usure	40	5	0.75	0.5	7	2	0.5	Traces d'usure
Altération de la surface par l'usure mécanique	Etat de surface	Usure	45	2	2	1	1		2	Traces d'usure
Diminution d'épaisseur par Délavage	Epaisseur	Délavage	V. Délavage							Abrasion par délavage
Diminution de l'étanchéité à l'air par des Chocs	Etanch. Air	Chocs		0.5*	0.3*	1.5*		18*	3.3*	Fissuration
Diminution de l'étanchéité à l'eau par des chocs	Etanch. Eau	Chocs		0.5*	0.3*	1.3*		10*	2.7*	Fissuration
Diminution de l'étanchéité à la vapeur par des chocs	λ_{vap}	Chocs		-Lv*RS						Fissuration
Diminution de l'aspect du à des chocs	Aspect	Chocs		2.5*	0.5*	1*		12*	1.5*	Traces de chocs

[illegible]

Annexe B

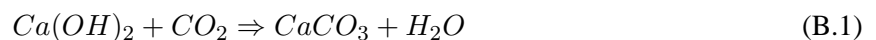
Modélisation de la carbonatation

Les fonctionnalités décrites ci-après ont été ajoutées à la famille des matériaux à base de liant hydraulique pour détecter un changement de leur valeur-pH dû à la carbonatation. La valeur-pH est par la suite utilisée pour prédire la corrosion d'aciers d'armatures incorporés dans les bétons armés.

Pour gérer les processus dans un modèle composé de plusieurs couches, les formules couramment utilisées pour estimer la progression du front de carbonatation ont dû être transformées et adaptées à la structure du modèle. Cela pour permettre la simulation de compositions contenant une succession de couches de caractéristiques différentes.

Le phénomène chimique

Par *carbonatation* on désigne une réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) contenu dans les matériaux à base de chaux hydrauliques et le gaz carbonique de l'air (CO_2) ambiant. La formule B.1 décrit la réaction de base de la carbonatation.



En soi, cette réaction n'affecte aucune propriété physique ni l'aspect du matériau de manière significative. La carbonatation ne peut donc pas être considérée comme une dégradation au sens "propre" du terme. Sa mauvaise "réputation" vient plutôt des conséquences de cette réaction sur la durabilité d'autres matériaux utilisés en combinaison avec les bétons et les mortiers. Ce sont principalement les pathologies des aciers d'armatures qui peuvent provoquer des dégâts suite à la carbonatation des bétons.

Modèle continu

L'apport de CO_2 pour la réaction de carbonatation se fait par pénétration du gaz depuis les parois de la couche qui sont à l'air libre. C'est pourquoi la transformation se passe d'abord à la surface du matériau pour ensuite se produire de plus en plus en profondeur. On désigne alors de *Front de Carbonatation*, une zone dans laquelle la réaction est active et qui avance de plus en plus vers l'intérieur.

La vitesse à laquelle ce front progresse dépend du taux de renouvellement de CO_2 depuis les parois et de ce fait du coefficient de diffusion de gaz dans le matériau. Selon Klopfer (1978) la profondeur de carbonatation pour un matériau homogène peut se calculer d'après la relation suivante :

$$y = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{c_0}{c_1} \cdot t} \quad (B.2)$$

avec :

y	en [mm]	profondeur de carbonatation
D	en [mm^2/a]	coefficient de diffusion du matériau
c_0	en [g/m^3]	concentration de CO_2 dans l'atmosphère à la surface du matériau (env 0.6 [g/m^3])
c_1	en [g/m^3]	quantité de CO_2 nécessaire pour carbonater $1m^3$ du matériau (env. 10'000 à 50'000 [g/m^3])
t	en [a]	Durée de carbonatation en années

Pour simplifier la relation B.2, Klopfer introduit le coefficient de carbonatation \bar{D} qui regroupe les trois paramètres D , c_0 et c_1 selon la relation :

$$\bar{D} = D \cdot \frac{c_0}{c_1} \quad (\text{B.3})$$

avec :

\bar{D} en [mm²/a] coefficient de carbonatation

Ainsi, l'expression B.2 est simplifiée et les caractéristiques du matériau sont exprimées par une seule grandeur (\bar{D}). Le coefficient de carbonatation est aussi facilement mesurable par des essais et souvent utilisé dans la littérature pour caractériser les différents bétons.

$$y = \sqrt{2 \cdot \bar{D} \cdot t} \quad (\text{B.4})$$

Modèle discret

La formule B.2 étant dérivée de la 1^{re} loi de Fick qui décrit le phénomène de diffusion dans une matière, on peut trouver des analogies avec d'autres phénomènes de diffusion notamment les lois Fourier utilisées aussi pour la conduction électrique. C'est pour cette raison que l'on peut décrire le processus de la diffusion du gaz carbonique CO₂ dans les matériaux avec un schéma électrique équivalent. Ceci nécessite l'introduction d'une résistance à la diffusion au gaz R_d déterminée par l'épaisseur de la couche Δy et le coefficient de diffusion de gaz D selon la relation suivante :

$$R_d = \frac{\Delta y}{D} \quad (\text{B.5})$$

En analogie avec la loi d'ohm, cette résistance permet de mettre en relation la différence de concentration du gaz Δc et le flux J_d induit par Δc .

$$\Delta c = J_d \cdot R_d \quad (\text{B.6})$$

Pour calculer la progression de la diffusion du CO₂ dans des parois par des éléments finis, on peut modéliser le matériau par une succession de couches. Par rapport à l'approvisionnement en CO₂, le phénomène de carbonatation est suffisamment lent pour que l'on puisse considérer que toute nouvelle arrivée de gaz carbonique de l'extérieur est entièrement utilisée pour la réaction chimique décrite plus haut (F :Carbonatation). Ainsi, à partir du *front de carbonatation*, la concentration de CO₂ à l'intérieur de la matière est nulle. Entre la surface extérieure et le front de carbonatation, par contre, la concentration CO₂ s'équilibre en fonction des coefficients de diffusion D_i des différentes couches. La partie haute de la figure B.1 illustre l'évolution de la concentration de CO₂ en fonction de l'avancement du front de carbonatation.

Pour le modèle discret cela équivaut à une carbonatation successive des différentes couches. La carbonatation de la couche i ne peut commencer que si la couche précédente est entièrement carbonatée. Dans les couches carbonatées la concentration s'équilibre en fonction des "résistances de diffusion" (R_D).

L'avantage de cette méthode consiste dans le fait que la propagation du front de carbonatation peut être calculée pour des parois composées de plusieurs couches à liant hydraulique qui ont des coefficients de diffusion différents (murs crépis) ou bien des parois en béton armé avec des peintures de protection.

Pour la carbonatation d'une couche i , les relations applicables sont les suivantes.

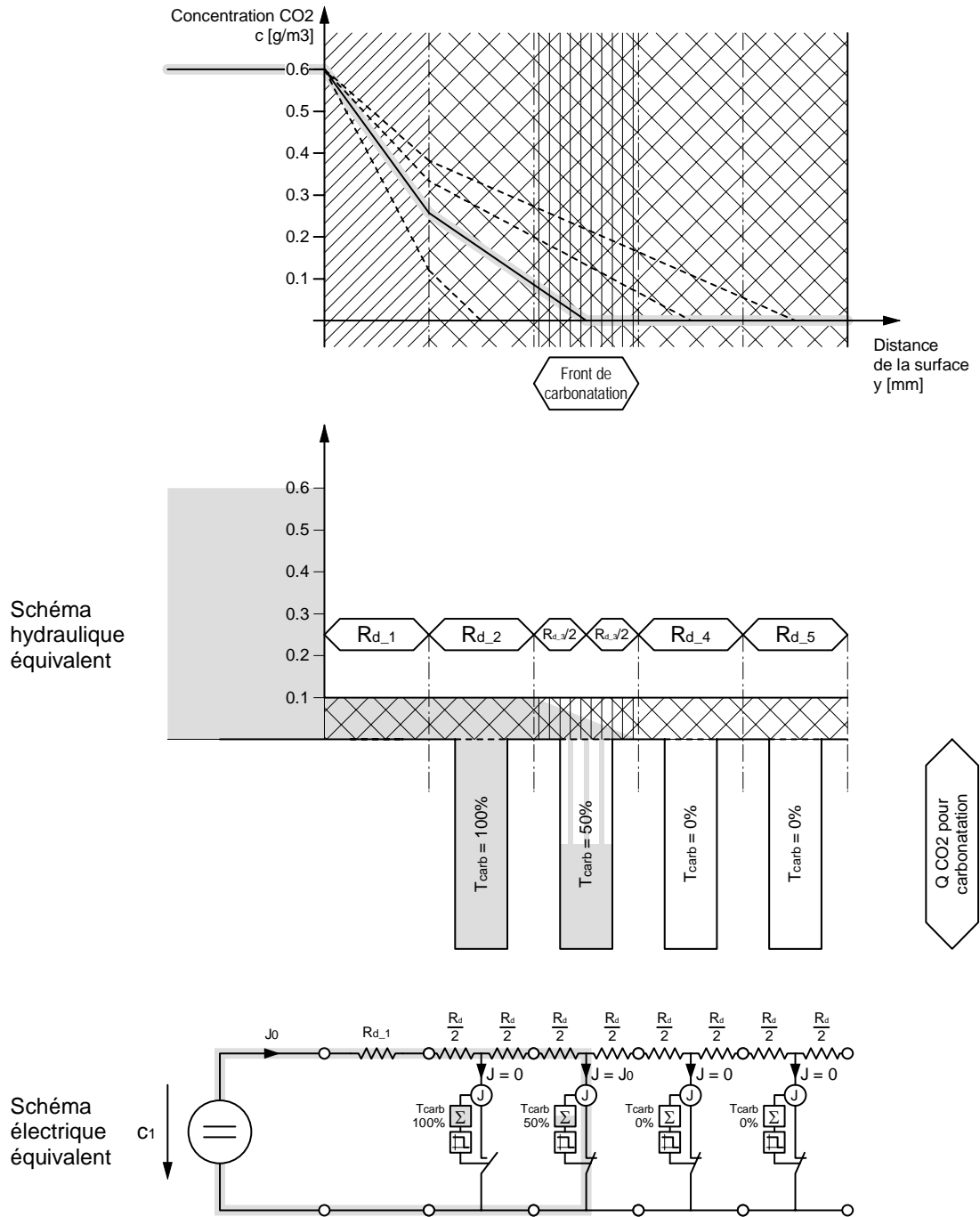


FIG. B.1 – Modèle discret de la carbonation

La résistance à la diffusion entre l'air libre et le centre de la couche est calculée par l'addition des différentes résistances partielles soit :

$$R_{ext \rightarrow i} = \sum_{k=1}^{i-1} R_{d_k} + \frac{R_{d_i}}{2} \quad (\text{B.7})$$

La diffusion se faisant entre l'air ambiant ($c = c_0$) et le front de carbonation avec une concentration nulle

($c = 0$), on peut calculer le flux de gaz pour la couche i selon la formule B.6 :

$$J_i = \frac{c_0}{\sum_{k=1}^{i-1} R_{d_k} + \frac{R_{d_i}}{2}} \quad (\text{B.8})$$

La quantité de gaz CO_2 nécessaire pour carbonater la couche entière dépend du coefficient c_1 (voir formule B.2) ainsi que de l'épaisseur de la couche Δy .

La durée nécessaire pour acheminer suffisamment de CO_2 nécessaire à la carbonatation de toute la couche se calcule ainsi :

$$t_i = \frac{c_{1_i} \cdot \Delta y}{J_i} \quad (\text{B.9})$$

Pour suivre l'évolution de la réaction dans le temps dans la simulation, un taux de carbonatation T_{carb} est utilisé. Celui-ci représente le pourcentage carbonaté de la couche, exprimé par le rapport entre la quantité de CO_2 reçue et la quantité de CO_2 nécessaire à carbonater toute la couche.

$$T_{carb} = \frac{\sum J_i \cdot \Delta t}{c_{1_i} \cdot \Delta y} \cdot 100\% \quad (\text{B.10})$$

Un taux de 100% correspond à une couche totalement carbonatée ce qui a comme conséquence que la valeur-pH passe de 12 à 7.

Utilisation dans la modélisation

Pour créer un modèle de béton armé, on doit utiliser plusieurs couches de béton entre calées de couches d'acier d'armature. La figure B.2 illustre ce principe.

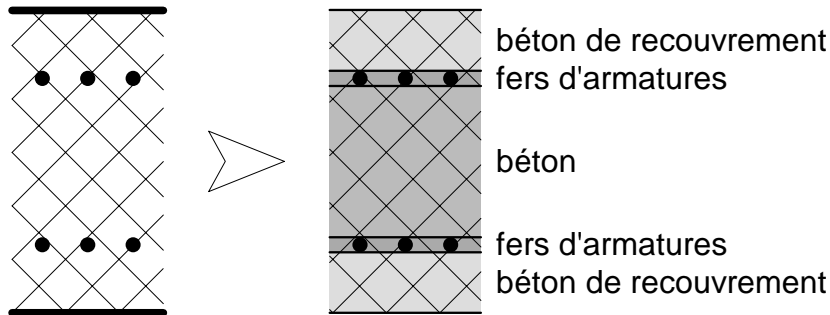


FIG. B.2 – Modelisation de béton armé

B.1 Vérification mathématique.

La présente description retrace le développement des formules pour la simulation de la carbonatation d'un élément multicouche.

Par analogie avec des modèles de conduction thermiques ou électriques, on peut introduire une résistance surfacique à la diffusion R_d qui dépend de l'épaisseur de la couche ainsi que du coefficient de diffusion au gaz D .

$$R_d = \frac{\Delta y}{D}$$

Le flux de diffusion J_d (en $[\frac{g}{s \cdot m^2}]$) est alors déterminé par $J_d = \frac{\Delta c}{R_d}$

Pour un modèle multicouche J_d se calcule ainsi : $J_i = \frac{c_0}{\sum_{k=1}^{i-1} R_{d_k} + \frac{R_{d_i}}{2}}$

Etant donné que la concentration de CO_2 à l'intérieur d'un matériau est nulle tant que toute la couche n'est pas entièrement carbonatée, le gradient de diffusion est variable en fonction de l'avancement de la réaction chimique.

Le flux de gaz carbonique se calcule alors

$$J_i = \frac{c_0}{R_{d_{tot}}} \quad (\text{B.11})$$

avec

$$R_{d_{tot}} = \sum_{k=1}^{i-1} R_{d_k} + \frac{R_{d_i}}{2} \quad (\text{B.12})$$

En connaissant également la quantité nécessaire pour carbonater 1m^3 des matériaux on peut déterminer la durée de carbonatation d'une couche.

$$\Delta t = \frac{m_{\text{CO}_2 \text{ carb}}}{J_d} = \frac{c_1 \cdot \Delta y}{c_0} \cdot \left(\sum_{k=1}^{i-1} R_{d_k} + \frac{R_{d_i}}{2} \right) \quad (\text{B.13})$$

dans le cas d'une seule couche, la formule B.13 peut être simplifiée pour retrouver la formule de Klopfer.

$$\Delta t = \frac{c_1 \cdot \Delta y}{c_0} \cdot \frac{\Delta y}{2 \cdot D} = \frac{c_1}{2 \cdot D \cdot c_0} \cdot \Delta y^2 \Rightarrow y = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{c_0}{c_1} \cdot t}$$

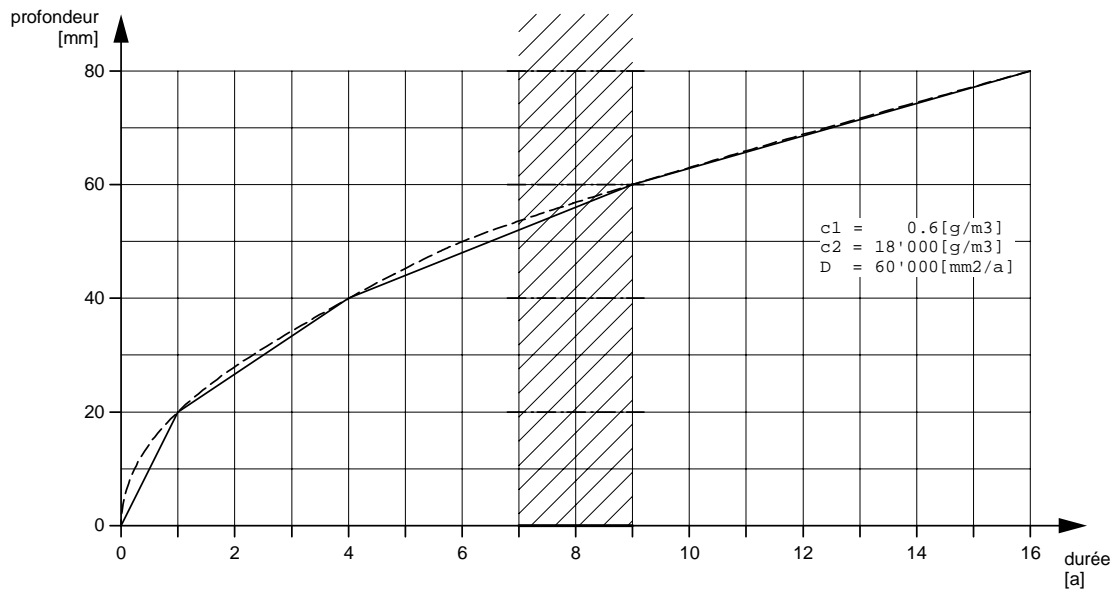


FIG. B.3 – Modèle discret de carbonatation

On peut également considérer les matériaux comme une succession de fines couches homogènes d'épaisseur égale.

$R_{d_{tot}}$ peut alors être simplifié

$$R_{d_{tot}} = (i - 0.5) \cdot R_{d_i} = (i - 0.5) \cdot \frac{\Delta y}{D}$$

la relation (2) peut devien alors

$$\Delta t = \frac{c_1}{c_0 \cdot D} \cdot \Delta y^2 \cdot (i - 0.5) \quad (\text{B.14})$$

pour trouver la durée totale de carbonatation t_N de N couches on additionne les couches

$$t_N = \frac{c_1}{c_0 \cdot D} \cdot \Delta y^2 \cdot \sum_{i=1}^N (i - 0.5) = \frac{c_1}{c_0 \cdot D} \cdot \frac{(N \cdot \Delta y)^2}{2} = \frac{c_1}{2 \cdot c_0 \cdot D} \cdot y_N^2 \quad (\text{B.15})$$

B.2 Analogies entre différents phénomènes de diffusion

Les phénomènes physiques de la diffusion des gaz ainsi que de la conduction de chaleur et d'électricité obéissent, dans une première approximation, tous à des lois linéaires très similaires. Le tableau suivant met en relations ces analogies ainsi que les correspondances entre les différentes grandeurs physiques.

description	Diffusion gaz	Diffusion vapeur d'eau	Transfert Chaleur	Electricité
Lois de base	$J_d = -D \cdot \frac{\delta c}{\delta x}$	$J_v = -\lambda_v \cdot \frac{\delta p}{\delta x}$	$J_{th} = -\lambda_{th} \cdot \frac{\delta T}{\delta x}$	$J_{el} = -\sigma_{el} \cdot \frac{\delta U}{\delta x}$
formule de base	$\Delta c = R_d \cdot J_d$	$\Delta p = R_v \cdot J_v$	$\Delta T = R_{th} \cdot J_{th}$	$\Delta U = R_{el} \cdot I$
Résistances surfaciques	$R_d = \frac{d}{D}$	$R_v = \frac{d}{\lambda_v}$	$R_{th} = \frac{d}{\lambda_{th}}$	$R_{el} = \frac{d}{\sigma_{el} \cdot A}$
grandeurs et unités	gradient de concentration $\frac{\delta c}{\delta x}$ en $[\frac{g}{m^4}]$	gradient de pression $\frac{\delta p}{\delta x}$ en $[\frac{Pa}{m}]$	gradient thermique $\frac{\delta T}{\delta x}$ en $[\frac{K}{m}]$	gradient électrique $\frac{\delta U}{\delta x}$ en $[\frac{V}{m}]$
	flux de gaz $J_d : [\frac{g}{s \cdot m^2}]$ ou $[\frac{g}{a \cdot m^2}]$	flux de vapeur $J_v : [\frac{mg}{h \cdot m^2}]$	flux de chaleur $J_{th} : [\frac{W}{m^2}]$	courant électrique $I : [A]$
	diff. de concentration $\Delta c : [\frac{g}{m^3}]$	diff. de pression $\Delta p : [Pa]$	diff. de température $\Delta T : [^\circ C]$ ou $[^\circ K]$	diff. de potentiel él. $\Delta U : [V]$
	résistance à la diffusion $R_d : [\frac{s}{m}]$	résistance à la vapeur $R_v : [\frac{Pa \cdot h \cdot m^2}{mg}]$	résistance thermique $R_{th} : [\frac{K \cdot m^2}{W}]$	résistance électrique $R_{el} : [\Omega]$ ou $[\frac{V}{A}]$
	coeff. de diffusion $D : [\frac{m^2}{s}]$ ou $[\frac{mm^2}{a}]$	conductivité de vapeur $\lambda_v : [\frac{mg}{m \cdot h \cdot Pa}]$	conductivité thermique $\lambda_{th} : [\frac{W}{m \cdot K}]$	conductivité électrique $\sigma_{el} : [\frac{A}{V \cdot m}]$

FIG. B.4 – Analogies entre les lois physiques de la *Diffusion CO₂*, *Diffusion vapeur H₂O*, *Conduction thermique* et *Conduction électrique*

Remarque :

La diffusion du gaz carbonique (colonne 1) et de la vapeur d'eau (colonne 2) obéissent aux mêmes lois mais sont souvent exprimés dans d'autres unités. Ainsi, le "moteur" de la diffusion de CO₂ est souvent exprimé par une différence de concentrations ($\frac{\delta c}{\delta x}$) alors que le "moteur" de la diffusion de la vapeur d'eau est indiqué

en tant que différence de la pression partielle de vapeur d'eau ($\frac{\delta p}{\delta x}$). La loi des gaz parfait permet de convertir des valeurs et les unités.

Documents Projet de recherche AMB

C.1 Historique de la méthode

La méthode présentée dans cette thèse est le fruit d'une recherche menée par François Iselin, architecte expert au sein du Service d'Expertise du EPFL-LCC1¹, ainsi que d'autres personnes sur une durée d'environ 15 ans. Pour comprendre la démarche ainsi que les différentes étapes de réflexion ayant mené à l'outil AMB, il paraissait important de retracer un historique de cette expérience ainsi que la genèse de la méthode.

C.1.1 ACE - Aide à la conception des enveloppes

Les premiers travaux à l'EPFL ayant comme but d'utiliser les moyens informatiques naissants pour simuler le comportement des enveloppes face aux contraintes remontent aux années 1980. Le programme de recherche *Aide à la Conception des Enveloppes* (ACE) fût le fruit d'une collaboration de deux départements de l'EPFL, l'*Institut Technique de Bâtiment* du Département d'Architecture (DA-ITB) ainsi que de la *Chaire d'Informatique Appliquée* du Département de Mathématiques. Ces travaux ont été conduits par François Iselin, architecte expert au sein du DA-ITB ainsi que par Jaques Menu de la *Chaire d'Informatique Appliquée* (prof. Ch. Rapin) à partir du début des années 1980 jusqu'en 1989.

Déclarant que la fonction des enveloppes "*est de séparer durablement deux milieux, soit le milieu habitable et son environnement immédiat*", Iselin et Menu (1989)² constatent : "*Au cours des dernières décennies, le nombre des matériaux de construction s'est considérablement accru et les enveloppes se sont complexifiées. Nous utilisons des centaines de matériaux et les enveloppes peuvent comporter plus d'une dizaine de couches. Ainsi le nombre de possibilités de construire une enveloppe est devenu pratiquement illimité. Si nous savons calculer les performances physiques d'une enveloppe donnée, il ne nous est pas possible d'obtenir toutes les solutions d'enveloppes qui satisfont à des exigences données. De plus, nous ne savons pas simuler le comportement dans le temps d'enveloppes précises.*" Le projet ACE est une tentative de résoudre les deux questions par une méthode unique.

Les diverses versions de l'outil informatique ACE étaient conçues comme des systèmes d'expert destinés à proposer à l'utilisateur des compositions d'enveloppes en indiquant les matériaux à mettre en place. Ceci à partir de la définition des milieux avant et arrière ainsi que des indications concernant la disposition de l'enveloppe. Le choix se faisait par comparaison des caractéristiques de séparation et des durabilités de matériau. L'algorithme avait la capacité de trouver les solutions d'enveloppes étant les mieux adaptées aux contraintes des deux milieux tout en respectant les exigences de séparation et le coût de l'enveloppe.

Au cours des années, plusieurs versions de ACE ont été développées. Cette évolution est rappelée par Iselin (1986) :

¹Le Laboratoire de Construction et de Conservation (LCC1), dirigé par le prof. Claude Morel, est issu de l'Institut Technique du Bâtiment (ITB)

²Voir annexe C.2

ACE 1 : Version test développée par D. Martin et I. Jammers, étudiants au cours de technique du Bâtiment de F. Iselin en 3ème année d'architecture, août 1984.

ACE 2 : Version prototype développée par L. de Trentinian dans le cadre de son travail de diplôme au département de mathématiques : ACE - Un système expert pour l'Aide à la Conception d'Enveloppes, décembre 1984. (Elle est programmée en langage Prolog pour des systèmes d'exploitation Unix sur des ordinateurs centraux VAX).

ACE 3 : Cette nouvelle version se veut "pratique". Elle contient toutes les données nécessaires à la recherche des matériaux composant une enveloppe architecturale quelconque. Le logiciel de cette version établi par J. Menu sera disponible dès avril 1986.

En 1986, l'équipe de recherche ACE 3 est composée de³

Conception : François Iselin (DA-EPFL)
 Programmation : Jacques Menu (DMA-EPFL)
 Conseil : Rodolphe Gapany (Phys. du bât)

En 1990 H. Lequay, architecte informaticien à l'école d'architecture de Lyon, prend le relais de la programmation de l'outil.

Les travaux sont repris dans un environnement Apple-Macintosh avec une base de donnée *Oracle*. L'outil est programmé en langage *Pascal*. Vers la fin de 1990 la nouvelle version ACE 4 voit le jour. Les copies d'écran de la figure C.1 illustrent l'aspect ainsi que les paramètres d'influence utilisés.

The figure displays four screenshots of the ACE 4 software interface, organized into a 2x2 grid. Each window has a title bar and contains various settings for architectural envelope design.

- Milieu avant (Top Left):**
 - Genre de Milieu: ☒ Fermé, ☐ Ouvert
 - Occupation: ☐ Nulle, ☐ Occasionnelle, ☒ Permanente
 - Habillage: ☐ Survêtus, ☒ Vêtus, ☐ Dêvêtus
 - Concentration: ☒ Forte, ☐ Faible
 - Activité: ☐ Lourde, ☐ Légère, ☒ Calme, ☐ Sommeil
 - Besoins et risques:
 - ☐ Air, ☐ Eau, ☐ Lumière, ☒ Phonique, ☐ Thermique, ☒ Feu, ☐ Vapeur
 - Buttons: OK, Renoncer
- Milieu arrière (Top Right):**
 - Genre de Milieu: ☐ Fermé, ☒ Ouvert
 - Altitude: ☒ < 500 m, ☐ 500 m .. 1500 m, ☐ > 1500 m
 - Bruit environnant:
 - ☐ Autoroute ou bruit intense, ☒ Industrie ou artère importante, ☐ Carrefour ou centre commercial, ☐ Rue ou magasin, ☐ Habitations ou rue piétonne, ☐ Pas de bruit
 - Buttons: OK, Renoncer
- Enveloppe (Bottom Left):**
 - Genre d'imposition: ☒ Complète, ☐ Noyau, ☐ Parements
 - (Milieu avant): 3 Couches
 - 1 vitre verre 2.6 mm
 - 2 vide d'air 14.0 mm
 - 3 glace verre 14.0 mm
 - (Milieu arrière):
 - Caractéristiques:

Prix	381.0	Fr/m2	K	3.1	W/m2 K
Epaisseur	30.6	mm	Ia	39.5	dB
			Kv	200.0	g/m h Pa
 - Buttons: Libre, Modifier, OK, Renoncer
- Disposition de l'enveloppe (Bottom Right):**
 - Etage: ☒ Rez, 1 ou 2, ☐ de 3 à 8, ☐ au-delà de 8
 - Mobilité: ☐ Fixe, ☐ Amovible, ☒ Mobile
 - Position: ☐ Horizontale, ☐ Inclinée, ☒ Verticale
 - Apports de lumière: ☒ Apports de lumière, ☐ Apports d'air, ☒ Ensoleillée, ☐ Exposée
 - Ouverture: ☒ 12%, ☐ 25%, ☐ 50%, ☐ 100%
 - Buttons: OK, Renoncer

FIG. C.1 – Fenêtres du logiciel ACE 4 version de 1990

³Iselin 1986

Les travaux sur ACE ont été présentés à plusieurs reprises dans des conférences internationales (voir tableau C.1) ou dans des articles (Iselin et al. 1985).

Date	Lieu	Org.	Titre	Article	Présenté par
6 fév. 1986	Paris	Moniteur	Journées du Moniteur Informatique et architecture	Un logiciel d'aide à la conception des enveloppes architecturales (ACE - AMB),	Iselin F. Menu J.
26 juin 1986	Lausanne	EPFL-CAST	Journée de rencontre EPFL-Economie, Informatique et bâtiment : nouvel outil du concepteur	Un logiciel d'aide à la conception des enveloppes architecturales (ACE prototype de AMB)	Iselin F. Menu J.
avril 1987	Lugano, Canobbio	SIA	SIA : Giornata di studio sull' informatica	Informatique et Construction (ACE - AMB)	Iselin F. Menu J.
19-23 juin 1989	Paris, Villette.	CIB	XIe congrès international CIB89 , La qualité pour les usagers des bâtiments à travers le monde	Une méthode pour la conception et la maintenance des enveloppes du bâtiment (ACE, ébauche de AMB), ACE Aide à la conception des enveloppes	Iselin F. Menu J.

TAB. C.1 – Présentation d'ACE dans des conférences

C.1.2 AMB - Assistance à la Maintenance des bâtiments

En 1988, le DA-ITB reçoit de l'Etat de Vaud un mandat pour une étude préliminaire intitulée *Evaluation technique et financière de l'entretien et de la conservation des bâtiments de l'Etat de Vaud*. Les objectifs de ce mandat sont :⁴

- d'étudier l'état des recherches dans le domaine de l'entretien des bâtiments,
- de proposer une méthode de gestion technique et financière en vue de l'entretien des bâtiments.

Ce mandat étant terminé en février 1989, les investigations sont reprises en mars 1992 dans le cadre d'un accord de participation de l'Etat de Vaud à la recherche intitulée AMB - ASSISTANCE À LA MAINTENANCE DES BÂTIMENTS. Cet accord prévoit des travaux de recherche sur une durée de 21 mois pour un montant de frs. 350'000.- cofinancé, à parts égales, entre l'EPFL et l'Etat de Vaud.

Les objectif du programme de recherche sont :⁵

- a) de compléter par des recherches les connaissances sur les caractéristiques des matériaux et des composantes d'enveloppes, leur comportement et en particulier leur durabilité lorsqu'ils sont soumis à diverses sollicitations ;
- b) de répondre au moyen d'un programme informatisé aux questions suivantes :
 - quelles dégradations affecteront les bâtiments à l'avenir ?
 - où seront-elles localisées ?
 - de quelle nature sont-elles ? et quelles en sont les conséquences ?
 - quel sera le coût de la réparation ?

Les travaux sont conduits au sein de l'ITB du Département d'Architecture par un groupe de recherche à la composition suivante⁶ :

⁴Source : Convention entre l'Etat de Vaud et l'EPFL dans le cadre de l'accord de participation concernant un programme de recherche intitulé : AMB - Assistance à la Maintenance de Bâtiments, préambule, déc. 1991

⁵Idem

⁶Idem

Responsable : R. Vittone (professeur au département d'architecture ITB)
 Chef de projet : J.-M. Plancherel (architecte au département d'architecture)
 Informaticien : H. Lequay (architecte, informaticien au département d'architecture)
 Architecte : F. Iselin (architecte au service d'expertises du département d'architecture)
 Ing. matériaux : V. Furlan (chimiste, professeur au département des matériaux)
 Economiste : P.-A. Jaccard (dr ès sciences techniques économiste au département de génie civil)
 Consultant ext. : H. Bercieux (architecte EPFL)
 Secrétariat : D. Perret (secrétaire à l'ITB, service d'expertises)

Les expériences et résultats du projet ACE forment la base du projet AMB. Le concept *Pouvoir de séparation* est affiné et transformé en *Performances*. La notion de *Sensibilité des matériaux face aux agents* est également portée plus loin pour simuler l'impact des contraintes sur l'évolution des performances dans le temps. Si dans ACE, l'objectif était de proposer la meilleure solution pour une enveloppe dans un cadre fixé par l'utilisateur, le projet AMB désire apporter des réponses concernant la durabilité de systèmes constructifs donnés.

Les travaux débouchent sur le développement de l'outil informatique AMB conçu essentiellement par l'architecte expert F. Iselin et l'architecte informaticien H. Lequay. Les apports de H. Bercieux portent surtout sur des questions de documentation.

De mai à novembre 1992, les auteurs travaillent sur une première version d'AMB dont les éléments de construction sont structurés d'après la classification CFE et dans laquelle les données sont gérées par une base de données *Oracle*.

Fin 1992, ce concept est abandonné et les données transférées vers une base de donnée *Hypercard*. La deuxième version est une tentative d'utiliser les *Piles Hypercard* pour effectuer la simulation. Cette voie, n'offrant pas les possibilités espérées, est abandonnée quelques mois plus tard en début 1993. La version définitive, développée dès 1993, est entièrement programmée en langage Pascal en tirant profit des techniques de la *Programmation Orientée Objet* (POO)⁷.

Présentation dans des séminaires et conférences internationales :

Date	Lieu	Org.	Titre	Article	Présenté par
17-20 nov 1992	Prague	ONU	La pathologie et la prévention des désordres	Un modèle prévisionnel global d'assistance à la maintenance des bâtiments (AMB)	Iselin F. Lequay H.
18 nov 1993	Lausanne	EPFL-CAST	Journée de rencontre EPFL-Economie	Utilité, concept et méthode d'analyse de l'outil AMB	Iselin F. Lequay H.
30 sept 1994	Varenna	CIB WS94	Colloque "Pathologie du Bâtiment"	Outil informatique d'assistance à la maintenance des bâtiments (AMB). De la recherche à l'application	Iselin F. Lequay H.
13 sept 1996	Canobbio	Ecole polytechnique de Milan	Journée de conférence, démonstration du logiciel AMB	Durabilité et maintenance des bâtiments (AMB)	Iselin F. Lequay H.

En octobre 1994 une convention de collaboration est établie entre le Service d'Expertise de l'Institut Technique du Bâtiment (F Iselin) et le laboratoire ARIA de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon (H. Lequay). Cette convention porte sur un rapprochement des deux unités pour assurer la poursuite des développements de l'outil AMB en profitant de la complémentarité des compétences des partenaires.

Dès 1995, les premières licences sont vendues à des universités et des bureaux d'architectures.

⁷En anglais : Object-oriented programming (OOP).

C.1.3 Objectifs de l'outil AMB

La convention de distribution (EPFL-ITB, 1994) accompagnant la licence d'AMB décrivait le programme ainsi :

"AMB est un outil de contrôle, de diagnostic et de simulation du comportement dans le temps de tout ouvrage incluant des enveloppes séparant deux milieux différents. Cet outil peut être utilisé, aussi bien pour le contrôle de projets, que pour l'optimisation de solutions de parois composites, que pour l'étude de rénovation, que pour la planification de la maintenance. Son cœur est un modèle mathématique du comportement des matériaux de construction, qui permet de simuler le vieillissement des matériaux utilisés, sous l'effet des contraintes qu'ils reçoivent, contraintes liées aux conditions climatiques et aux conditions d'utilisation des locaux."

Selon Iselin et al. (1994), le développement du programme informatique AMB a été guidé et orienté par plusieurs objectifs fixés au départ et pour la plupart atteints :

- *La saisie des bâtiments sur plan ou sur place devait être rapide : quelques heures au plus par bâtiment. Cette exigence a été imposée par notre mandant pour qui la saisie de ses quelques mille bâtiments n'était envisageable qu'à condition qu'elle puisse se faire dans un temps limité.*
- *Pour que la saisie puisse être faite aussi rapidement que possible, l'utilisateur bénéficie de bibliothèques de matériaux, de milieux, d'éléments et d'installations. Il pourra y puiser les objets nécessaires sans devoir les réécrire et les décrire.*
- *Les résultats devaient être donnés instantanément en cours de saisie, ceci afin de permettre à l'utilisateur d'AMB de corriger ou compléter les informations enregistrées et de bénéficier de l'aide à la saisie. En effet, lorsque l'utilisateur d'AMB se trouve par exemple sur un toit, le logiciel lui indique les points particuliers à contrôler.*
- *Les résultats devaient être présentés de façon suffisamment concise et à la fois précise pour que l'utilisateur en ait à la fois une bonne compréhension et une vue exhaustive. Cette exigence explique pourquoi les résultats sont donnés de différentes façons.*
- *Finalement AMB devait pouvoir aussi bien diagnostiquer sur plans qu'in situ et, dans ce cas, tant les parois dont on connaît la composition exacte que celles qui, faute d'être décrites ou sondées, comportent un ou plusieurs matériaux inconnus.*

Après l'introduction de la composition des parois à analyser ainsi que le choix des milieux, le programme procède à la simulation. AMB présente les résultats à l'utilisateur de diverses façons, soit pour chaque élément, soit sous forme de récapitulatif pour l'ensemble du bâtiment.

Les différents niveaux d'analyse et de présentation sont :

- **Vérification des performances initiales**
AMB calcule les performances initiales des parois considérées et les compare aux performances minimales fixées pour chaque type de parois. Ainsi, dès la saisie, on saura par exemple si telle façade est suffisamment étanche à l'eau pluviale, suffisamment isolante, etc.
- **Limite critique d'abaissement d'une performance**
La baisse des performances étant calculée annuellement, AMB présente dans un calendrier les dates auxquelles les performances atteignent une limite critique.
- **Variation des performances dans le temps**
Ces variations peuvent être visualisées sur un graphique de synthèse indiquant les baisses de performances et les niveaux de performances initiales.
- **Incompatibilités entre matériaux adjacents**
Certains dégâts précoces peuvent résulter de la juxtaposition inopportune de deux matériaux incompatibles. Ces défauts de conception sont signalés à l'utilisateur dès la saisie.
- **Apparition et aggravation des désordres**
Le calendrier signale également l'année de mise en route d'un processus de dégradation et son évolution.
- **Explication des phénomènes de vieillissement**
Certains résultats présentés de façon succincte peuvent surprendre l'utilisateur qui n'en comprend pas la

cause. Ainsi AMB leur présente une explication détaillée, une description générale du phénomène et les sources bibliographiques s'y rapportant.

Enfin AMB se double d'un didacticiel offrant à son utilisateur la possibilité d'approfondir ses connaissances en pathologie des constructions.

Malheureusement en fin 1997, le financement pour poursuivre les recherches n'étant plus assuré, la décision est prise par la direction de l'Institut Technique du Bâtiment (ITB) de mettre un terme au développement d'AMB.

C.2 Article ACE

Article présenté au XIe congrès international - La qualité pour les usagers des bâtiments à travers le monde, CIB 89, Paris, Vilette, 19-23 juin 1989. pp.575-581.

A METHOD FOR THE DESIGN AND THE MAINTENANCE OF BUILDINGS ENVELOPES (Une méthode pour la conception et la maintenance des enveloppes du bâtiment)

ISELIN François, MENU Jacques
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

KEY WORDS : Envelope - Building - Durability - Performances - CAD

ABSTRACT

The object of the envelope design assistance project ("Aide à la Conception des Enveloppes", ACE) aims at producing adequate solutions for the construction of walls, roofs, windows,... These solutions are produced in the form of a descriptive list of the materials composing the envelopes. They satisfy all the requirements and constraints imposed by the environment (indoor and outdoor).

The user of ACE (designer or builder) defines his problem by answering a questionnaire on the activities which take place in an indoor environment, the characteristics of the surroundings and the particularities of the envelope which is wanted and aimed for.

This programme must also allow the control of the existing envelopes, their separation and duration performance, that is, their future behaviour. In this case the user also provides the composition of the envelope which is to be controlled.

L'ENVELOPPE, COMPOSANT ESSENTIEL DU BATIMENT

Les enveloppes sont les principaux composants des bâtiments. Leur fonction est de séparer durablement deux milieux, soit le milieu habitable et son environnement immédiat. Le terme d'enveloppe englobe toute partie de construction séparant deux milieux dont les caractéristiques physiques doivent être différentes. Il s'agit entre autres des façades, toitures, cloisons, vitrages, portes, planchers.

Au stade actuel de développement, le programme d'aide à la conception des enveloppes n'aborde pas les autres composants du bâtiment tels que les structures, les installations de conditionnement, les réseaux de canalisations et les équipements.

Au cours des dernières décennies, le nombre des matériaux de construction s'est considérablement accru et les enveloppes se sont complexifiées. Nous utilisons des centaines de matériaux et les enveloppes peuvent comporter plus d'une dizaine de couches. Ainsi le nombre de possibilités

de construire une enveloppe est devenu pratiquement illimité. Si nous savons calculer les performances physiques d'une enveloppe donnée, il ne nous est pas possible d'obtenir toutes les solutions d'enveloppes qui satisfont à des exigences données. De plus, nous ne savons pas simuler le comportement dans le temps d'enveloppes précises. Cette information nous permettrait aussi bien de choisir des solutions en fonction d'une durabilité souhaitée que de prévoir les interventions futures sur des enveloppes construites et d'en évaluer le coût.

Nous avons tenté par une méthode unique de résoudre l'une et l'autre de ces questions. L'aide à la conception de nouvelles enveloppes intéressera principalement les architectes et les constructeurs. L'aide à l'évaluation du comportement des enveloppes dans le temps s'adresse aux professionnels de la maintenance des parcs immobiliers. L'aide à la conception fournit les variantes de solutions d'enveloppes répondant à un programme architectural donné. Ces variantes "exactes" pourront être sélectionnées à partir des critères de coca, d'épaisseur, de nombre de couches, de performances. L'aide à la conservation indique quels seront les sinistres probables qui affecteront l'une ou l'autre des couches et des enveloppes d'un bâtiment, les effets de ces désordres sur les performances et les mesures à prendre.

MATERIAUX D'ENVELOPPE

Pour analyser le bâtiment dans son ensemble, nous avons choisi de les décomposer jusqu'à parvenir à ses constituants élémentaires que sont les couches des enveloppes. Ces "cellules" sont caractérisées par la matière qui les constitue et leur épaisseur. chaque matériau a des caractéristiques propres de séparation et de durabilité.

Parmi les caractéristiques des matériaux, nous avons retenu les degrés d'étanchéité à l'air, à l'eau et à la vapeur, les degrés d'opacité, d'isolation thermique et phonique, les résistances au feu, à l'usure et aux chocs. Parmi les caractéristiques de durabilité, nous avons noté les degrés de résistance aux érosions éolienne et hydraulique, à l'humidité, au rayonnement, à l'échauffement, au gel, à l'usure et aux chocs. D'autres caractéristiques telles que masse volumique, coût et mobilité, nécessaires au calcul des performances, sont également prises en compte. Finalement le matériau peut être désigné par son nom habituel, sa dénomination commerciale ou sa composition. En effet, pour éviter toute confusion, nous préférons désigner les matériaux simples par leur matière constitutive (terre cuite, verre, asphalte) et les matériaux composites par les matières de ses trois constituants : le liant, l'armature et les charges (la notation : ciment/acier/sable + gravier désigne un béton armé).

La base des matériaux recueille 68 informations pour plus d'une centaine de matériaux. Les douze informations concernant les caractéristiques de séparation sont quantifiées en unités physiques, le cas échéant par une échelle arbitraire, de 1 à 5. Les trente-six informations relatives à la durabilité sont notées en nombre d'années de résistance probable dans des conditions d'exposition "standard".

MILIEUX HABITABLES

Le milieu habitable est caractérisé par les activités qui s'y exercent et le mode d'habillement des occupants, desquels découlent les exigences de confort et de sécurité de l'enveloppe. Par exemple, s'il s'agit d'un atelier de mécanique, les exigences seront déduites de l'exercice d'un travail lourd.

En ce qui concerne le confort thermique, les températures seront comprises entre 16 et 20 C. Quant à la durabilité, la résistance aux chocs des parements d'enveloppes proches du plan de travail devra être élevée. Il découlera de cette activité que l'atelier peut être bruyant. Ainsi, dans le cas où le milieu environnant devrait être calme l'isolation phonique de l'enveloppe serait calculée en conséquence.

Les performances de l'enveloppe découlent également de la présence dans le milieu habitable de certains équipements domestiques. Ainsi l'amenée d'eau dans un milieu impliquera l'étanchéité de ses revêtements de sol et muraux et la production de vapeur d'eau entraînera des risques de condensations accrus.

MILIEU ENVIRONNANT

L'environnement dans lequel l'enveloppe est située a une incidence sur ses performances de séparation et de durabilité. L'environnement de l'enveloppe est caractérisé par l'altitude du lieu, la présence de voies de circulation, d'établissements industriels, d'habitations, etc..

PERFORMANCES DE SÉPARATION

Par performances de séparation d'une enveloppe on entend l'étanchéité à l'eau, à l'air, à la vapeur -si des risques de condensations sont à craindre-, l'opacité, l'isolation thermique et phonique, ainsi que la résistance au feu, aux chocs et à l'usure des couches superficielles.

Le degré de séparation d'un facteur découle de l'analyse des contraintes et des exigences pour le facteur considéré. Par exemple le degré de séparation d'une enveloppe au bruit tiendra compte des exigences de confort acoustique dans le milieu habitable et des nuisances sonores dans le milieu environnant.

Dans certains cas, les performances de séparation devront également satisfaire aux contraintes du milieu habitable lorsque son environnement requiert que des exigences de confort soient satisfaites. En fait, la distinction habitable/environnant n'est qu'une question de terminologie le milieu environnement peut également être un milieu fermé, habitable.

PERFORMANCES DE DURABILITÉ

Le programme pourrait évidemment ne retenir que les variantes d'enveloppes dont la durabilité serait par exemple de 20, 30 ou 50 ans. Ces solutions seraient des enveloppes dont toutes les couches garderaient leurs performances de séparation pendant cette durée. Mais dans ce cas les peintures apparentes, par exemple, seraient écartées. C'est pourquoi les performances de durabilité d'une enveloppe ne peuvent pas être fixées avant la recherche des solutions. Ce sera à l'utilisateur de trier les variantes selon ses propres critères de durabilité et les travaux de réfection qu'il compte mettre en oeuvre. Lorsque la couche éphémère est apparente, sa réfection est possible et l'enveloppe peut convenir, ce qui n'est pas le cas lorsque les couches sensibles sont inaccessibles ou difficilement accessibles. La méthode écarte évidemment les couches dont la durabilité est nulle ou insuffisante.

CHOIX ET DISPOSITION DES COUCHES DE L'ENVELOPPE

Les exigences de séparation minimales étant déterminées par la confrontation des niveaux des divers facteurs dans les milieux habitable et environnant, la méthode permet de rechercher l'ensemble des solutions adéquates. On procédera par combinaison de tous les matériaux que le concepteur envisage d'utiliser. On cherchera d'abord les solutions à une couche puis deux, trois et ainsi de suite. La recherche est interrompue lorsqu'un nombre suffisant de solutions sont apparues et que les nouvelles solutions deviennent excessivement complexes et coûteuses.

L'utilisateur trie alors les variantes selon ses propres critères de coût, d'épaisseur, de performance thermique, phonique, etc. On teste combinatoirement toutes les combinaisons des matériaux restant après un filtrage initial effectué selon les réponses au questionnaire jusqu'à un nombre a priori illimité de couches. Les solutions sont les variantes qui subsistent après élimination des combinaisons qui ne satisfont pas toutes les exigences de séparation et de durabilité requises. Telle couche sensible aux UV sera écartée si elle figure en parement exposé au soleil. Par contre, elle sera gardée si une nouvelle couche insensible et opaque au rayonnement la protège.

ENVELOPPES PARTICULIÈRES

Le questionnaire demande les particularités de l'enveloppe recherchée.

Selon qu'elle soit inclinée ou plate, son exposition à la pluie sera différente. Si elle est située au rez-de-chaussée ou au 10^e étage, les contraintes dues au vent seront différentes. Finalement son orientation déterminera l'existence et l'importance de facteurs tels que l'échauffement solaire. Le questionnaire demande si l'on souhaite que l'enveloppe soit transparente ou ouvrante. Le filtrage mentionné plus haut fait que les solutions d'enveloppes transparentes ne seront constituées que

de matériaux d'opacité nulle, les enveloppes ouvrantes ou amovibles telles que portes, fenêtres ou cloisons ne seront constituées que de matériaux légers et insensibles aux mouvements brutaux.

L'utilisateur peut limiter la recherche de solutions d'enveloppes à certains matériaux de son choix. Il peut également imposer les matériaux constituant l'une ou l'autre des parements ou même des couches internes, ce qui s'avère nécessaire lors d'études de rénovation.

DÉVELOPPEMENTS

La méthode présentée ici est le fruit d'une évolution retracée dans (3), où l'on décrit le système ACE-3.

Les solutions proposées par la méthode ACE ne sont pas parfaites. De nombreux critères constructifs ne sont pas pris en compte tels que la résistance mécanique des enveloppes, la compatibilité entre les couches (seule la rigidité est prise en compte), la différenciation des enveloppes selon leur emplacement, les points singuliers, etc.. Les solutions -souvent originales- doivent être prises comme des propositions, des suggestions qui restent à évaluer d'après des critères constructifs, plastiques et économiques. C'est une carte de mets, tous excellents, mais aucun ne s'impose à priori : il faut choisir.

Malgré ces limites, la méthode devrait permettre d'améliorer la qualité des bâtiments en proposant des enveloppes qui satisfont parfaitement les exigences les plus importantes. On est surpris de constater, en testant des enveloppes construites récemment en Suisse, que plusieurs d'entre elles sont rejetées par la méthode. L'isolation thermique est insuffisante, il existe des solutions plus simples ou plus économiques, le nombre de couches est excessif, tel matériau utilisé ne convient pas pour l'usage qui en est fait. La méthode devrait également permettre d'abaisser le coût des enveloppes en contrôlant au départ leur durabilité, de mettre en oeuvre des solutions économiques peu durables mais dont l'entretien prévisible est aisé. Elle devrait également inciter ses utilisateurs à mettre en oeuvre les matériaux nouveaux, à innover sans pour autant compromettre la qualité, sans élever le coût des ouvrages ou prendre des risques sur la durabilité. Finalement ce programme devrait permettre lors de la conception, d'avoir plus de temps à consacrer à l'aspect créatif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ISELIN F., Technique du bâtiment, Problèmes des constructions actuelles, EPFL, Lausanne, 1981.
2. ISELIN F., MENU J., DE TRENTINIAN L., "ACE, une aide à la conception des enveloppes architecturales", Chantiers No 16, Montreux, 5/1985.
3. ISELIN F., MENU J., "D'un système expert à un algorithme : ACE-3" Revue d'intelligence artificielle, 1, pp 55/74, Hernies, Paris, 2/1987.
4. ISELIN F., MENU J., DE TRENTINIAN L., "ACE : une aide à la conception d'enveloppes architecturales", 5e Journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, Avignon, 13-15 mai 1985.

C.3 Article AMB

Article présenté au colloque "Pathologie du Bâtiment", Symposium CIB WS94, Conseil International du Bâtiment, 30. sept. 1994, Varenna (Italie).

OUTIL INFORMATIQUE D'ASSISTANCE A LA MAINTENANCE DES BATIMENTS (AMB) .

François ISELIN
Hervé LEQUAY
Henry BERCIoux

EPFL - Department of Architecture - ITB - Lausanne -
Switzerland
Architecte et informaticien
Architecte EPFL

ABSTRACT

The AMB software is a tool for building mainenance capable of checking each completed or projected building. It analyses any sicknesses in constructive systems and incompatibilities between materials. This diagnostic program can be useful for planners and proprietors of buildings.

The AMB software furnishes a timetable for every event in the life of a construction, its problems and remedies. This information is available for the construction in its entirety as well as its constituent parts and shell. The results are presented through graphic curves and a chronological diary accompanied by suggestions.

The user introduces the necessary data from plans or results from borings, defining each characteristic while choosing from an integral catalogue : interior and exterior environment, composition and thickness of layers, exposition and orientation, climate, glass surfaces and slopes. All these elements are used to construct composite walls and their surroundings. As the characteristics can be modified at any time through each of the constituent parameters, the same wall can become a component of the library or can be used for other constructions. In order to enhance the user-friendly facilities, windows and dialogues are superposable, juxtaposable and available at any time.

RESUME

Le logiciel AMB d'assistance à la maintenance des bâtiments est capable d'ausculter tout bâtiment construit ou en projet. Cet outil analyse également la pathologie

des systèmes constructifs et les incompatibilités entre matériaux. Ce diagnostic informatique peut s'avérer utile pour les concepteurs et propriétaires d'immeubles.

Le logiciel AMB fournit un calendrier de l'ensemble des événements concernant l'évolution de l'état du bâtiment, de leurs conséquences et des remèdes possibles. Ces indications sont aussi bien disponibles pour le bâtiment dans sa globalité qu'au niveau du détail des couches et enveloppes le constituant. Les résultats sont présentés sous forme de courbes et de carnets chronologiques imprimés accompagnés de suggestions.

L'utilisateur introduit les données dont le logiciel a besoin à partir des plans ou de sondages. Il définit chacune de ces caractéristiques en choisissant des composants dans la bibliothèque intégrée : milieux intérieurs et extérieurs, composition et épaisseur des couches, exposition et orientation, climat, surfaces vitrées, pentes. Tous ces éléments servent à construire les parois composites et les environnements. Comme les caractéristiques peuvent être modifiées à tout moment, en fonction de chacun des paramètres la constituant, une même paroi peut devenir un composant de la bibliothèque et peut être utilisée pour d'autres bâtiments. Afin de faciliter la convivialité, l'utilisateur dispose de fenêtres et de dialogues superposables, juxtaposables et disponibles à tout moment.

1. Faut-il prévoir le vieillissement des bâtiments?

Le vieillissement des bâtiments se manifeste par une suite de désordres plus ou moins graves. Ces désordres affectent le confort et la sécurité des occupants, la valeur et l'intégrité de tout ou partie des bâtiments. Faute d'être prévus, ces désordres chargent les budgets d'entretien et de réparation, et impliquent des interventions d'urgence, décidées au coup par coup, donc interdisant la possibilité de les planifier.

La prévision de ces désordres permet dans la plupart des cas de les prévenir par des mesures de maintenance ou de réparation d'autant moins coûteuses qu'elle sont prises à temps.

Tout professionnel du bâtiment, un tant soit peu expérimenté, peut certes diagnostiquer le bâtiment par une observation attentive de ses composants et éventuellement quelques sondages ou essais en laboratoire. Mais cette tâche est lourde, le nombre de bâtiments en Suisse ayant doublé depuis les années 50. De plus, pour être efficace, leur surveillance doit être périodique et comme les désordres qui affectent les bâtiments récents sont pour la plupart atypiques - on utilise de plus en plus de matériaux et de nouvelles techniques -, leur diagnostic prend passablement de temps.

Ainsi, faute de personnel compétent ou disponible, la surveillance préventive des ouvrages se fait mal ou pas du tout. Un des buts d'AMB est d'effectuer ces tâches que l'on pourrait appeler expertise préventive et continue des bâtiments.

2. Des contrôles de qualité sont nécessaires.

La prévention des désordres par leur prévision est possible, mais elle implique des contrôles de qualité aux divers stades de la vie de l'ouvrage.

Comme en Europe, plus du 40% des désordres sont dus à des erreurs de conception constructive, il est évident qu'un premier test de faisabilité doit être effectué sur **les plans d'exécution**. Dans ce cas l'outil informatique AMB simule le comportement du bâtiment virtuel placé dans ses conditions futures d'exploitation et soumis aux contraintes climatiques et d'occupation.

Un deuxième contrôle devrait se faire **au cours des premières années** de mise en exploitation de l'ouvrage. C'est en effet au cours de cette période de rôdage - qui correspond à la période de garantie - que les erreurs de

conception et de mise en oeuvre apparaissent et doivent être corrigées. A ce stade, AMB est surtout utilisé pour analyser des désordres particuliers.

Puis, des **contrôles périodiques de routine** doivent être entrepris tout au long de la durée de vie du bâtiment. AMB qui a acquis et gardé en mémoire les constituants du bâtiment peut établir à tout moment un check-up. Le responsable du bâtiment sera alors informé de l'opportunité d'une visite sur place et de la localisation des éléments qu'il devra contrôler. Il décidera alors en connaissance de cause des mesures de maintenance ou de réparation appropriées.

Pour qu'un logiciel puisse tirer la sonnette d'alarme, il doit pouvoir prévoir les événements qui affectent les divers constituants de la construction. L'estimation statistique de la durée de vie des éléments en est un.

3. Limites de l'estimation statistique de la durée de vie.

Plusieurs programmes informatiques permettent actuellement de simuler le vieillissement des bâtiments (Schröder, Merip, Sims, Entropi, etc). Tous ces programmes, dits statistiques, établissent leur pronostic sur la base de courbes de vieillissement. La durée de vie d'un élément y est déterminée par deux points: un niveau initial au temps 0 (qui peut être une performance, une valeur, etc) et une échéance finale. Ces points sont reliés par une droite ou une courbe selon la finesse du logiciel. Ces informations découlent d'estimations statistiques tirées d'enquêtes auprès des architectes, d'expertises de bâtiments ou de statistiques de gestion d'immeubles.

De par leur simplicité, ces courbes de vieillissement ont l'avantage de simplifier les calculs. Cependant elles présentent des inconvénients de taille:

- La **durée de vie** est une notion certes pratique, mais vague puisqu'elle peut désigner indifféremment la ruine d'un élément, la perte d'une de ses performances essentielles ou l'obsolescence fonctionnelle.
- Cette durée de vie s'applique à **des éléments de construction** (toiture, façade, installation électrique), soit à un ensemble de matériaux dont le comportement propre n'est pas pris en compte. Le calcul donnera ainsi la durée de vie probable d'une fenêtre, mais ignorera la cause du vieillissement. Ainsi l'utilisateur de tels logiciels risque de remplacer la fenêtre toute entière au lieu de

- s'attaquer aux causes de son vieillissement.
- Les courbes de vieillissement ne tiennent que peu ou pas compte du tout du **niveau des contraintes** auquel l'élément est exposé. Ainsi la durée de vie d'une fenêtre sera la même quelles que soient son exposition et les sollicitations qu'elle subit.
- Elles s'appliquent à des éléments de certaines **techniques et périodes** de construction. Or la durée de vie d'une fenêtre en bois des années 50 n'est évidemment pas la même que celle de nos vitrages actuels.

4. Le calcul de la durée de vie selon AMB.

Ces raisons, et d'autres encore, nous ont conduit à rechercher une méthode permettant de calculer précisément le comportement des bâtiments dans le temps.

Pour ce faire, nous avons basé notre recherche sur trois domaines d'informations:

- L'énumération des matériaux élémentaires constitutifs du bâtiment.
- La recherche des niveaux de contraintes effectives subies par chacun de ces matériaux.
- La modélisation des divers phénomènes pouvant affecter ces matériaux, soit l'effet des contraintes sur les performances des matériaux.

La durée de vie d'un bâtiment, élément ou matériau peut ainsi être décrite comme la variation de chacune de ses performances dont on estimera la gravité. Cette information essentielle résulte du comportement spécifique de chacun de ses matériaux constitutifs.

Les spécialistes de la prévision des désordres du bâtiment sont souvent sceptiques quant à la possibilité de modéliser les comportements des matériaux dans le temps. Et ceci pour plusieurs bonnes raisons:

- Le bâtiment avec son fouillis de matériaux disparates, de parois, structures, joints et installations serait bien trop complexe pour pouvoir être modélisé.
- Le comportement des matériaux - et en particulier des matériaux traditionnels - dépend trop des aléas de leur fabrication et de leur mise en oeuvre pour pouvoir être cerné.
- Comme les dégradations résultent le plus souvent d'un nombre élevé de contraintes provoquant des désordres en chaîne, il n'est pas possible de les modéliser, ni même de les comprendre.

Bref, l'approche méthodique de la durabilité est souvent considérée comme illusoire et même dangereuse par manque de rigueur scientifique. Ces objections sont certes fondées, mais elles négligent un fait fondamental en architecture: il est plus important pour les concepteurs et gestionnaires de bâtiment d'avoir un outil imparfait, que pas d'outil du tout... Dans un tout autre domaine, les paysans ou les promeneurs préfèrent avoir une prévision météorologique indicative sur trois jours qu'une prévision rigoureuse limitée aux trois prochaines heures.

Le diagnostic méthodique des désordres tel qu'il est effectué par AMB n'est possible que si certains préalables sont satisfaits:

- Ce processus d'analyse ne peut s'effectuer que sur les **matériaux élémentaires** constitutifs du bâtiment. L'utilisateur d'AMB devra par conséquent fournir au logiciel non pas des parties de bâtiment, ni même des éléments de construction, mais l'ensemble des matériaux qui les constituent.
- Les processus de dégradation ne peuvent être décrits et modélisés qu'en partant d'une bonne **connaissance des phénomènes**. L'observation du comportement dans le temps d'un nombre significatif de bâtiments est donc indispensable. Pour établir les modèles de vieillissement, les auteurs d'AMB ont pu bénéficier des enseignements de plus de 500 cas d'expertise, de la littérature traitant de la pathologie des constructions et des connaissances de divers spécialistes.
- Finalement le recours aux moyens informatiques est indispensable car ils sont seuls à pouvoir réaliser rapidement des tâches aussi complexes, et ceci déjà en cours de saisie sur le bâtiment, grâce à un ordinateur portable.

5. Contraintes, objectifs et résultats de la recherche.

Le développement du programme informatique AMB a été guidé et orienté par plusieurs objectifs fixés au départ et pour la plupart atteints:

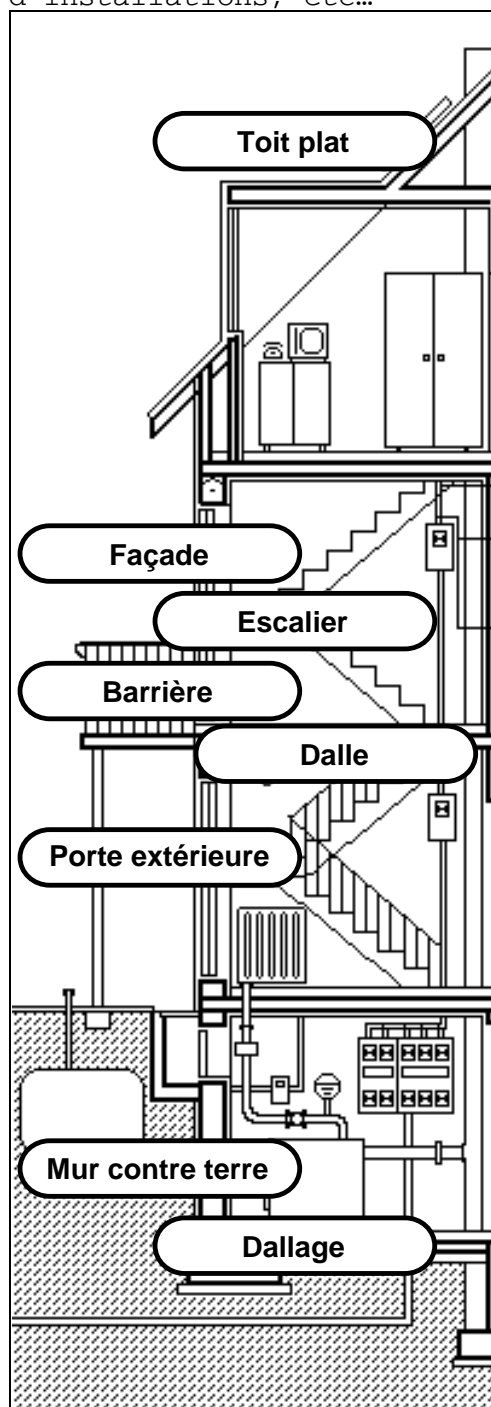
- La saisie des bâtiments sur plan ou sur place devait être rapide: quelques heures au plus par bâtiment. Cette exigence a été imposée par notre mandant pour qui la saisie de ses quelques mille bâtiments n'était envisageable qu'à condition qu'elle puisse se faire dans un temps limité.

- Pour que la saisie puisse être faite aussi rapidement que possible, l'utilisateur bénéficie de bibliothèques de matériaux, de milieux, d'éléments et d'installations. Il pourra y puiser les objets nécessaires sans devoir les réécrire et les décrire.
- Les résultats devaient être donnés instantanément en cours de saisie, ceci afin de permettre à l'utilisateur d'AMB de corriger ou compléter les informations enregistrées et de bénéficier de l'aide à la saisie. En effet, lorsque l'utilisateur d'AMB se trouve par exemple sur un toit, le logiciel lui indique les points particuliers à contrôler.
- Les résultats devaient être présentés de façon suffisamment concise et à la fois précise pour que l'utilisateur en ait à la fois une bonne compréhension et une vue exhaustive. Cette exigence explique pourquoi les résultats sont donnés de différentes façons.
- Finalement AMB devait pouvoir aussi bien diagnostiquer sur plans qu'in situ et, dans ce cas, tant les parois dont on connaît la composition exacte que celles qui, faute d'être décrites ou sondées, comportent un ou plusieurs matériaux inconnus.

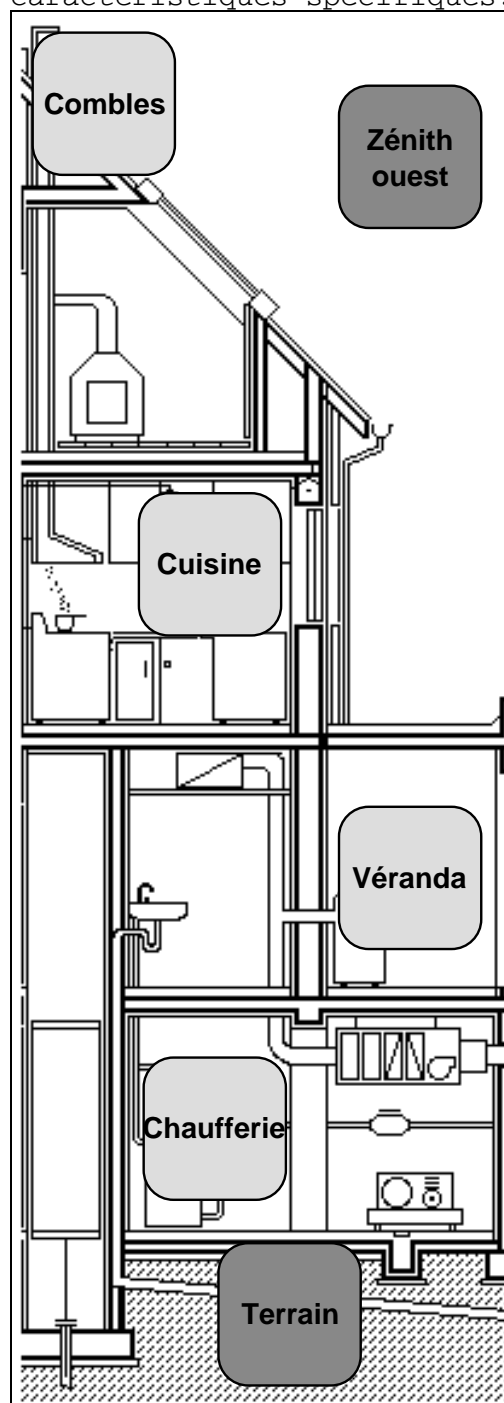
6. Concepts et méthode d'analyse AMB.

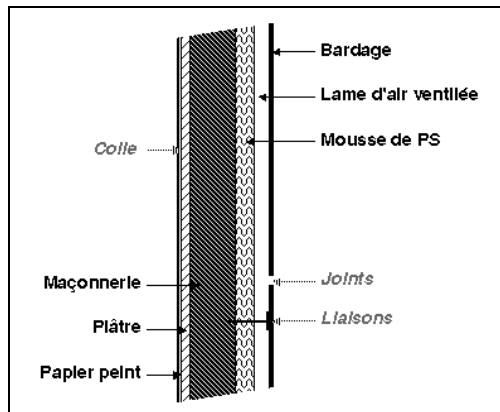
Voici très sommairement les concepts que nous avons considérés et la méthode utilisée par AMB pour tout processus d'analyse:

Le bâtiment est constitué d'un ensemble de **parois** (ou enveloppes), mais aussi de joints, de structures, d'installations, etc...

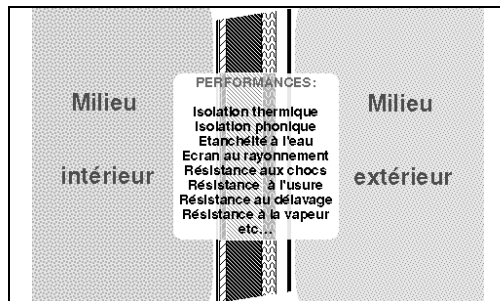


Chacune de ces parois est placée entre deux **milieux** qu'elle sépare, chacun de ces milieux ayant des caractéristiques spécifiques.

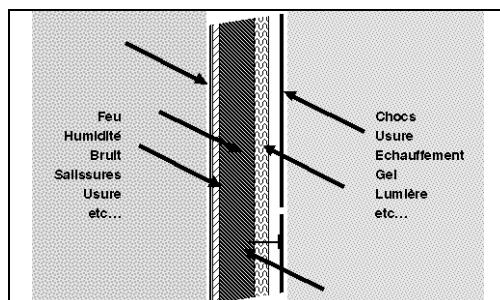




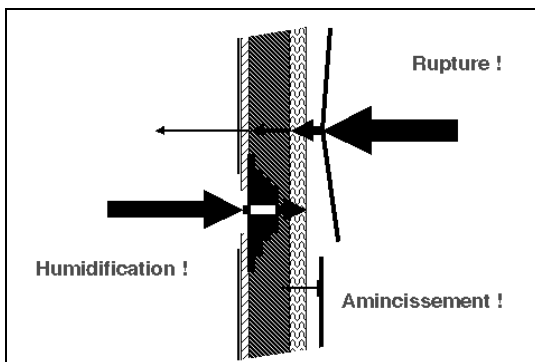
Les parois sont constituées d'un ensemble de **couches**, chacune formée par un matériau unique.



Ainsi chaque couche a des **performances** initiales bien définies, dépendant du matériau utilisé.

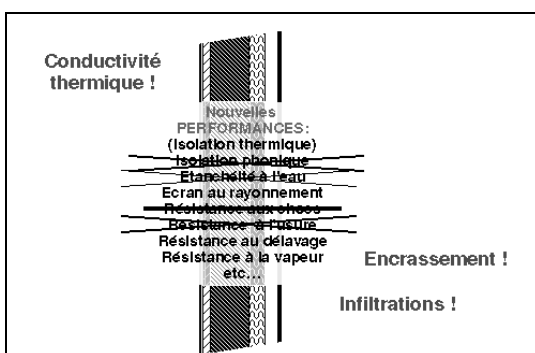


Les couches subissent des **contraintes** engendrées par les milieux.



Ces contraintes peuvent se **propager** à travers les couches et leur **intensité** peut être modifiée en cours de propagation.

Les contraintes **altèrent** les performances des matériaux en les dégradant.



Nous appelons **désordre** toute modification significative d'une performance par une ou plusieurs contraintes.

Nous avons ainsi caractérisé une trentaine de types de parois et leurs performances séparatives, une vingtaine de milieux et leurs contraintes, ainsi qu'une centaine de matériaux caractéristiques, tant traditionnels que contemporains.

Toutes ces bibliothèques peuvent être modifiées, complétées et organisées à tout instant par l'utilisateur, à l'exclusion de celle concernant les matériaux.

7. Présentation des résultats.

Le processus d'analyse étant relancé itérativement par pas de un an, c'est chaque année que AMB connaît le niveau des performances de chaque matériau et l'intensité des contraintes qui les affectent.

Pour répondre aux différentes interrogations de l'utilisateur, les résultats d'AMB lui sont présentés de diverses façons, soit pour chaque élément, soit sous forme de récapitulatif pour l'ensemble du bâtiment.

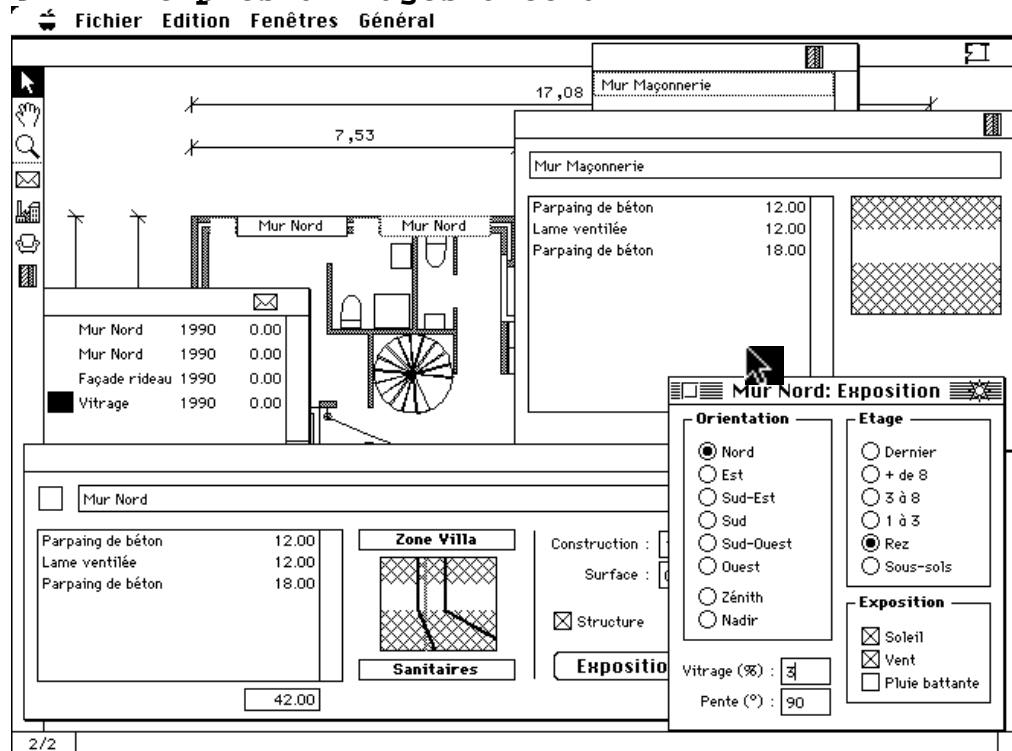
- **Vérification des performances initiales**
AMB calcule les performances initiales des parois considérées et les compare aux performances minimales fixées pour chaque type de parois. Ainsi, dès la saisie, on saura par exemple si telle façade est suffisamment étanche à l'eau pluviale, suffisamment isolante, etc.
- **Limite critique d'abaissement d'une performance**
La baisse des performances étant calculée annuellement, AMB présente dans un calendrier les dates auxquelles les performances atteignent une limite critique.
- **Variation des performances dans le temps**
Ces variations peuvent être visualisées sur un graphique de synthèse indiquant les baisses de performances et les niveaux de performances initiales.
- **Incompatibilités entre matériaux adjacents**
Certains dégâts précoces peuvent résulter de la juxtaposition inopportune de deux matériaux incompatibles. Ces défauts de conception sont signalés à l'utilisateur dès la saisie.
- **Apparition et aggravation des désordres**
Le calendrier signale également l'année de mise en route d'un processus de dégradation et son évolution.
- **Explication des phénomènes de vieillissement**
Certains résultats présentés de façon succincte peuvent surprendre l'utilisateur qui n'en comprend pas la cause. Ainsi AMB leur présente une explication détaillée, une description générale du phénomène et les sources bibliographiques s'y rapportant.

Enfin AMB se double d'un didacticiel offrant à son utilisateur la possibilité d'approfondir ses connaissances en pathologie des constructions.

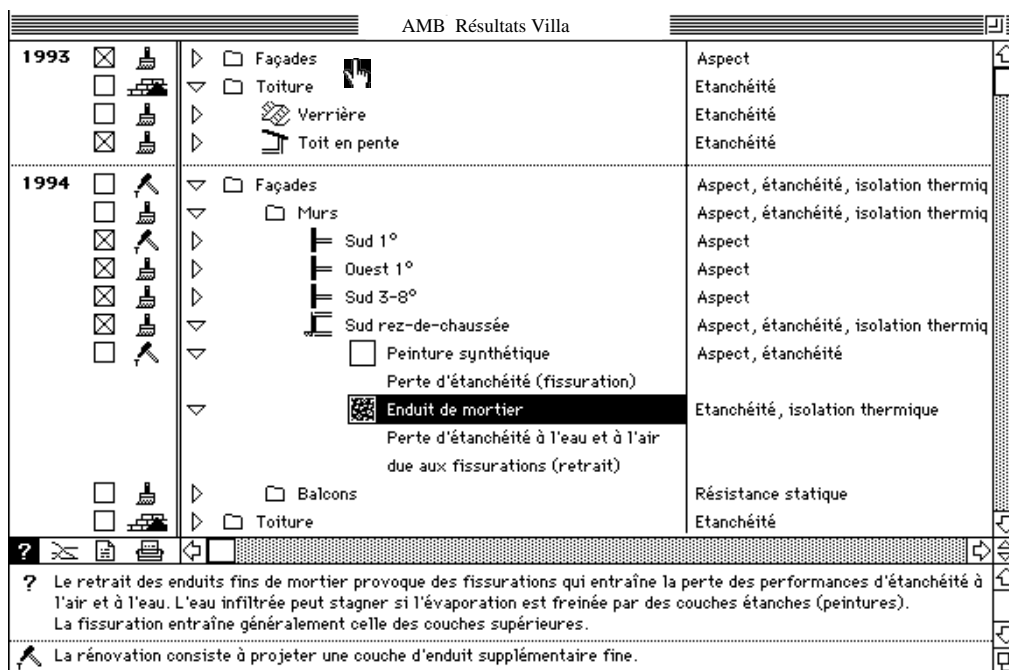
8. Extensions de AMB.

Les nombreux processus d'analyse ayant été implantés et contrôlés, une nouvelle étape de développement d'AMB s'impose. Il s'agit en effet d'augmenter les potentialités du logiciel en y intégrant des processus de dégradation plus rares et complexes, ainsi que des modules de calcul permettant d'accomplir d'autres tâches spécifiques.

9. Exemples d'images d'écran.



Exemple de définition de paroi et premier diagnostic



Exemple de calendrier des désordres d'un bâtiment

Annexe D

Littérature

Dans cette annexe trois séries d'ouvrages qui contiennent une grand quantité du savoir concernant la durabilité et la pathologie des bâtiments sont rescencé. Ces ouvrages, présentés dans les paragraphes 2.2.2, 2.2.1 et 2.3 sont :

- Les rapports d'état de l'art de la commission de travail CIB W080 - PREDICTION OF SERVICE LIFE OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS qui retraçent les divers efforts de recherches internationaux concernant les méthodes de prévision de durée de vie.
- Les actes des 11 conférences internationales sur la durabilité des matériaux et composants.
- La série de livres SCHADENFREIES BAUEN, éditée depuis 1992 par la maison Fraunhofer IRB Verlag.

D.1 Publications CIB

N°	Année	Titre	Editeurs
294	2004	State of the Art Report - Factor methods for service life prediction and Engineering design methods for service life prediction	Hovde P.J. et Moser K.
295	2004	Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components	Jernberg P., Lacasse M., Haagenrud S. et Sjöström C.
310	2006	Failure Modes Effects and Criticality Analysis, Research for and Application to the Building Domain - State of the art Report	Talon A., Chevalier J.-L. et Hans J.
331	2010	CIB W080 WG3 : Test Methods for Service life Prediction, State of the Art Report on Accelerated Laboratory Test Procedures and Correlation between Laboratory Tests and Service Life Data	Daniotti B. et Re Cecconi F.

TAB. D.1 – Publications édités par le CIB W080
Ces rapports sont disponible sur www.cibworld.nl

D.2 Proceedings DBMC

Conf.	Date	Lieu Pays	Proceedings
1dbmc	1978 21-23 août	Ottawa Canada	Sereda, P. and G. Litvan, Eds. (1978) First International Conference on Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
2dbmc	1981 14-16 sept.	Gaithersburg USA	Frohnsdorff, G. and B. Horner, Eds. (1981) Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Building Materials and Components, 14-16 Sep., National Bureau of Standards, Washington, D.C., USA.
3dbmc	1984	Esoo Finland	Sneck, T. and A. Kaarresalo, Eds. (1984) Third International Conference on the Durability of Building Materials and Components, 4 Vols., Espoo, Finland.
4dbmc	1987 4-6 nov.	Pergamon Singapore	Lee, S.L., Ed. (1987) Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the Forth International Conference, Singapore, 4-6 Nov.
5dbmc	1990 7-9 nov.	Brighton Angleterre	Baker, J.M., P.J. Nixon, A.J. Majumdar and H. Davies, Eds. (1990) Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the Fifth International Conference held in Brighton, U.K., 7-9 November.
6dbmc	1993 25-28 oct.	Tokyo, Omiya Japon	Nagataki, S., T. Nireki, and F. Tomosawa, Eds. (1993) Durability of Building Materials and Components, 2 Vols., Proceedings of the 6th International Conference, Omiya, Japan, Oct., E et FN Spon, London, UK.
7dbmc	1996 19-23 mars	Stockholm Suède	Sjöström, C., Ed. (1996), Durability of Building Materials and Components 7, 2 Vols., Proceedings of the 7th International Conference, Stockholm, Sweden, May, E et FN Spon, London, UK.
8dbmc	1999 30 mai-3 juin	Vancouver Canada	Lacasse, M.A. et Vanier, D.J. , 1999. , "Durability of Building Materials and Components 8 , service life and asset management proceedings of the Eighth International Conference on Durability of Building Materials and Components (8dbmc), Vancouver, Canada, May 30-June 3, 1999 ". , Ottawa : National Research Council of Canada , 4 vols.
9dbmc	2002 17-21 mars	Brisbane Australie	
10dbmc	2005 17-20 avril	Lyon France	Chevalier, J-L., Eds, 2005. 10dbmc - Durability of building materials and components, Proceedings of the 10th International conference on building materials and components ; Lyon, 17-20 Avril 2005 . Grenoble : CSTB.
11dbmc	2008 11-14 mai	Istambul Turkie	Türkeri, A. et Sengül, Ö., 2008. , "Durability of building Materials and Components 11 (dbmc11), Globality and Locality in Durability ; conference proceedings". , Istambul : I.T.U., vol 1-4.
12dbmc	2011 12.15 avril	Porto Portugal	A venir

TAB. D.2 – Récapitulation des conférences internationales *Durability of Building Materials and Components* (dbmc)

D.3 Collection *Schadenfreies Bauen*

Vol.	Auteurs	Titre	Année
1	Ruhnau, R.	Schäden an Aussenwandfugen im Beton- und Mauerwerksbau	1992
2	Lohmeyer, G.	Schäden an Flachdächern und Wannen aus wasserundurchlässigem Beton	1993
3	Klopfer, H.	Schäden an Sichtbetonflächen	1993
4	Cziesielski, E. ; Schrepfer, T.	Schäden an Industrieböden	1999
5	Schulze, H.	Schäden an Wänden und Decken in Holzbauart	1993
6	Klein, W.	Schäden an Fenstern	1994
7	Zimmermann, G.	Risschäden an Mauerwerk	1994
8	Cziesielski, E. ; Bonk, M.	Schäden an Abdichtungen in Innenräumen	1994
9	Künzel, H.	Schäden an Fassadenputzen	1994
10	Liersch, K. W.	Schäden an Aussenwänden mit Asbestzement-, Faserzement- und Schieferplatten	1995
11	Sauder, M. ; Schloenbach, R.	Schäden an Aussenmauerwerk aus Naturstein	1995
12	Lubinski, F.	Schäden an Metallfassaden	1995
13	Klaas, H. ; Schulz, E.	Schäden an Aussenwänden aus Ziegel- und Kalksandstein-Verblendmauerwerk	1995
14	Brand, B. ; Glatz, G.	Schäden an Tragwerken aus Stahlbeton	1996
15	Aurnhammer, K. G.	Schäden an Estrichen	1996
16	Jenisch, R.	Tauwasserschäden	1996
17	Muth, W.	Schäden an Dränanlagen	1997
18	Satzger, H.t	Schäden an Deckenbekleidungen und abgehängten Decken	1998
19	Ruhnau, R. ; Fouad, N. A.	Schäden an Aussenwänden aus Mehrschicht-Betonplatten	1998
20	Cziesielski, E. ; Vogdt, F. U.	Schäden an Wärmedämm-Verbundsystemen	2000
21	Küffner, P. ; Lummertzheim, O.	Schäden an Glasfassaden und -dächern	2000
22	Scheewe, H.-J.	Schäden an elastischen und textilen Bodenbelägen	2001
23	Schumacher, R.	Schäden an Türen und Toren	2001
24	Wirth, H. ; Wirth, S.	Schäden an Installationsanlagen - Heizungs- und raumluftechnische Anlagen, Trinkwasser-, Abwasser- und Gasinstallationsanlagen	2001
25	Zimmermann, G.	Schäden an Belägen und Bekleidungen mit Keramik- und Werksteinplatten	2001
26	Engelfried, R. ; Klopfer, H.	Schäden an polymeren Beschichtungen	2001
27	Baumgartner, H. ; Kurz, R.	Mangelhafter Schallschutz von Gebäuden	2003
28	Dröge, G. ; Dröge, T.	Schäden an Holztragwerken	2003
29	Rapp, A. O. ; Sudhoff, B.	Schäden an Holzfußböden	2003
30	Oehme, P. ; Vogt, W.	Schäden an Tragwerken aus Stahl	2003
31	Philipps, G. ; Stollhoff, F. ; Wieck, J.	Die vorsorgliche Beweissicherung im Bauwesen	2004
32	Bonk, M. ; Anders, Frank	Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz	2004
33	Oster, N.	Schäden an Balkonen	2004
34	Hilmer, K. ; Knappe, M. ; Englert, K.	Gründungsschäden	2004
35	Oswald, R. ; Rojahn, H.	Schäden an genutzten Flachdächern	2005
36	Ruhnau, R. ; Platts, T. ; Wetzels, H.-H.	Schäden an Abdichtungen erdberührter Bauteile	2005
37	Gerhardt, H. J.	Windschäden	2005
38	Zimmermann, G. et al.	Wasserschäden - Schadensfälle - Leckortung - Bautrocknung - Verantwortlichkeit	2005
39	Haustein, T.	Schäden durch fehlerhaftes Konstruieren mit Holz	2006
40	Zimmermann, G.	Schäden an Dachdeckungen	2006
41	Schrepfer, T. ; Gscheidle, H.	Schäden beim Bauen im Bestand	2007
42	Oster, N. ; Bredemeyer, J. ; Schmidt, T.	Nutzereinfluss auf Schäden an Gebäuden	2007

Annexe E

Bibliographie

ABCB , 2006. , *Durability in Buildings - Guideline Document* . , Canberra Australie : Australian Building Codes Board (ABCB), 28 p.

Disponible à : <http://www.abcb.gov.au>

[Accédé le : 12.07.2010].

ADDLESON, L. ET RICE, C. , 1991. *Performance of materials in buildings , a study of the principles and agencies of change* . Oxford : Butterworth-Heinemann .

AFFOLTER, S. , 200 ? . *Langzeitverhalten von Thermoplasten* . NTB :Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, 20p.

Disponible à : http://www.ntb.ch/files/0/2224/Alterung_SA.pdf

[Accédé le : 30.07.2008].

ALAIMO, G. ET ACCURSO, F. , 2005. *The Durability Evaluation for Sandwich panels : First Experimental Results* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-99.

ARLT, J. ET PFEIFFER, M. , 2005. *Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau* ., Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag , F 2464 , 131 S.

ASHTON, H.E. , 1967. Qu'est-ce que la peinture ? . *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-76-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-076.html>

[Accédé le : 03.12.2008].

ASHTON, H.E. , 1967. Les peintures et autres revêtements de finition. *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-78-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-078.html>

[Accédé le : 03.12.2008].

ASHTON, H.E. , 1973. Altération des matériaux organiques de construction due à l'atmosphère. *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-117-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-117.html>

[Accédé le : 01.12.2008].

ASHTON, H.E. , 1974a. Essais accélérés de durabilité sur matériaux organiques de construction. *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-118-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-118.html>

[Accédé le : 03.12.2008].

ASHTON, H.E. , 1974b. Effets de l'irradiation sur les matériaux organiques. *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-121-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-121.html>

[Accédé le : 01.12.2008].

ASHTON, H.E. ET SEREDA, P.J. , 1982. Environnement, Microenvironnement and Durability of Building Materials. *Durability of Building Materials* , Vol.1, No.1, Jan. 1982, p.49-65.

BAKER, M.C. , 1972. La pourriture du bois. *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-111-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-111.html.html>

[Accédé le : 03.12.2008].

BALARAS, C.A. ET AL. , 2005. *Service life of building elements & installations in European apartment buildings* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 avril 2005. CSTB : Lyon, France, TT5-113.

BEER, H.R., DELGADO1, A.H., PAROLI, R.M. ET GRAVELINE, S.P. , 2005. *Durability of PVC Roofing Membranes - Proof by Testing After Long Term Field Exposure* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 avril 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-157.

BLACHÈRE, G. , 1969. *Savoir bâtir, Habitabilité - Durabilité - Economie des bâtiments* . Paris : Ed. Eyrolles.

BLAICH, J. , 1999. *La détérioration des bâtiments, Analyse et prévention* . Dübendorf : EMPA.

BS 8200 :1985. *Design of non-loadbearing vertical enclosures of buildings* . Milton Keynes : British Standards Institution.

BUERGEL-GOODWIN, E. , 2004. *Vergleichende Studie zu Erneuerung, Unterhalt un Betrieb von Bestandsgebäuden auf Bauteilebene* .

Disponible à : <http://www.ifib.uni-karlsruhe.de/de/beval/EbbaBuergelGoodwinDiplomSS2004.pdf>

[Accédé le : 17.02.2010].

CARLSSON, B. ET AL. , 2002. *General Methodology Of Test Procedures For Assessment Of Durability And Service Life* . In : Proceedings of the 9th Durability of Building Materials and Components Brisbane, Australia, 17-21 March 2002, paper n°212, publié dans Talon et al. (2006), p.100-112.

CARLSSON, B. ET AL. , 2005. *Study on Durability and Service Lifetime Prediction of some Static Solar Energy Materials* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 avril 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-232.

CHOFFET J.-C. ET ISELIN F. , 1995. La pathologie du bâtiment, une nouvelle discipline, AMB :un logiciel d'assistance à la maintenance du bâtiment. *Chantiers* , vol. 1/95, p.72-75.

CIB/W060 , 1982. *Working with the Performance Approach in Building* ., Rotterdam : International Council for Building Research Studies and Documentation, Publication 64, 30 p.

CZIESIELSKI, E. ET VOGDT, F.U. , 2000 . *Schäden an Wärmedämm-Verbundsystemen* . Stuttgart : IRB Verlag, Informationszentrum Raum und Bau der Fraunhofer-Gesellschaft.

DALGLIESH, W.A. ET BOYD, D.W. , 1964. Le vent sur les bâtiments. *Digests de la construction au Ca-*

nada, *Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-28-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-028.html>

[Accédé le : 01.12.2008].

DANIEL, H., JAN, A., BOJAN, S. ET MIKAEL, K. , 2008. *Life Cycle Management System - A Planning Tool Supporting Long-term Based Design and Maintenance Planning* . In : *Durability of building Materials and Components 11* . : Istambul, T72-111.

DANIOTTI, B. , 2005. *Evaluating the Service Life of External Walls : a Comparison, between Long-Term and Short-Term Exposure* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-106.

DANIOTTI, B. ET PAOLINI, R. , 2005. *Durability Design of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT5-164.

DANIOTTI, B. ET LUPICA SPAGNOLO, S. , 2008. *Service Life Prediction Tools for buildings' Design and Management* . In : *Durability of building Materials and Components 11* . : Istambul, T72-191.

DANIOTTI, B. ET RE CECCONI, F. , 2010. *CIB W080 WG3 : Test Methods for Service life Prediction, State of the Art Report on Accelerated Laboratory Test Procedures and Correlation between Laboratory Tests and Service Life Data* . CIB W080 Prediction of Service Life for Buildings and Components, 331, 107 p.

Disponible à : http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/w080_wg3_report.pdf

[Accédé le : 01.07.2010].

DANIOTTI, B., LUPICA SPAGNOLO, S. ET PAOLINI, R. , 2008a. *Climatic Data Analysis to Define Accelerated Ageing for Reference Service Life Evaluation* . In : *Durability of building Materials and Components 11* . : Istambul, T32-195.

DAVIES, H. ET WYATT, D. , 2005. *Appropriate use of the ISO 15686-1 factor method for durability and service life prediction* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT5-208.

DE BALEINE, F. , 2003. Le réseau PeBBu et le CIB font avancer l'approche performantielle dans le bâtiment.

DE TRENTINIAN, L. , 1984. *ACE - Un système expert pour l'Aide à la Conception d'Enveloppes* . Travail pratique de diplôme, Automne 1984, Lausanne : EPFL, Département de mathématiques.

DIN 52108 :2007. *Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe - Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme - Schleifscheiben-Verfahren*. Deutsches Institut für Normung.

DOBROLUBOV, G. ET ROMER, A. , 1977. Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frost-Tausalzbeständigkeit von Zementbeton, Anhang Norm SNV 640 461. *Strasse und Verkehr* , 1977 No 10+11.

DUCROT, B. , 1987. Perennité des bétons de façades, l'utilité d'un diagnostic. *L'étanchéité - L'Isolation* , n°149 - 2ème trimestre 1987, pp.41-44.

ELSENER , 1985. Corrosion des armatures dans le beton. *Durabilité du béton armé - Origines des dégâts, Prévention, Assainissement* , Documentation SIA 89, pp.23-27, Conférences des journées d'étude des 26 et 27 mars 1985 à Lausanne.

ENGELFRIED, R. , 1977. *defazet 31* , Heft 9 (1977), p.353-359.

EOTA GD 002 :1999. *Assessment of working life of products* . European Organisation for Technical Approvals - EOTA, 26 p.

Disponible à : <http://www.eota.be/pdf/gd002.pdf>

[Accédé le : 20.08.2009].

EOTA GD 003 :1999. *Assessment of working life of products* . European Organisation for Technical Approvals - EOTA, 26 p.

Disponible à : <http://www.eota.be/pdf/gd003.pdf>

[Accédé le : 20.08.2009].

EPFL - ITB , 1994. , *AMB : Diagnostic Contrôle Simulation - Convention de Distribution* . EPFL - ITB, document interne.

ETAG 004 :2000. *Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems With Rendering (ETICS)* . Brussels : European Organisation for Technical Approvals - EOTA.

Disponible à : http://www.eota.be/pdf/FG004_ETICS_FIN2.pdf

[Accédé le : 17.11.2009].

FLÜELER, P., STUCKI, M., GUASTALA, F. ET EGLI, T. , 2008. *Hail Impact Resistance of Building Materials, Testing Evaluation and Classification* . In : *Durability of building Materials and Components 11.* : Istanbul, T32-197.

FREI, U., BRUNOLD, STEFAN, ET HÄUSELMAN, THOMAS , 1995. , *Langzeit-Alterungsuntersuchungen an Abdeckungsmaterialien für thermische Sonnenkollektoren* . ITR Rapperswil - SPF.

Disponible à : <http://www.spf.ch/publ/materialien/abde.pdf>

[Accédé le : 30.07.2008].

GASPAR, P.L. ET DE BRITO, J. , 2005. *Assessment of the global degradation level of an element, based on field data* . In : *10th International Conference On Durability of Building Materials and Components (10dbmc)*, Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT8-68.

GRAF, E. , 1995. *La préservation du bois - Une contribution à la qualité des ouvrages. Blauch J., "La détérioration des bâtiments"* .

HAAGENRUD, S.E. , 1997. *Environmental Characterisation including Equipment for Monitoring* . CIB W80/RILEM 140-PSL, Sub Group 2 Report Norwegian Institute for Air Research (Norsk institutt for luftforskning, NILU), Kjeller, Norway.

HAAGENRUD, S.E. , 2004. *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components - Part II - Factors Causing Degradation* . CIB W80 / RILEM TC 140.

Disponible à : <http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/Pub295.html>

[Accédé le : 20.08.2009].

HAAGENRUD, S.E. ET AL. , 2005. *Environmental characterisation and mapping with respect to Durability* . In : *10th International Conference On Durability of Building Materials and Components (10dbmc)*, Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT9-131.

HALLBERG, H. , 2005. *Quantification of exposure classes in The European Standard, EN 206-1* . In : *10th International Conference On Durability of Building Materials and Components (10dbmc)*, Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT9-134.

HANS, J. , 2005. *Sustainable tools and methods for estimating building materials and components service life* . In : 10th International Conference On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT4-90.

HANS, J., CHORIER, J., CHEVALIER, J. ET LUPICA, J. , 2008. *French National Service Life Information Platform* . In : Durability of building Materials and Components 11. : Istambul, T41-306.

HEGGER, M., AUCH-SCHWELK, V., FUCHS, M. ET ROSENKRANZ, TH. , 2005. *Baustoff Atlas* . München : Institut für internationale Architektur-Dokumentation.

HOVDE, P.J. , 2005. *The Factor Method - a simple Tool for Service Life estimation* . In : 10th International Conference On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT4-115.

HOVDE, P.J. ET MOSER, K. , 2004. *State of the Art Report - Factor methods for service life prediction and Engineering design methods for service life prediction* . CIB W080, CIB Report : Publication 294, 107 p.

IP BAU , 1994. *Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten, Grundlagen für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten* . Impulsprogramm Bau - Erhaltung und Erneuerung (IP Bau), Bern : Bundesamt für Konjunkturfragen, 110 p.

ISELIN F. , 1991. A Propos de la durabilité des constructions (AMB), Prévoir le comportement des bâtiments dans le temps. *Habitation* , pp.3-4 et 7-8.

ISELIN F. , 1996. Durabilité, désordres. *Vittone R., Bâtir* , Ch.5, pp.177-195.

ISELIN, F. , 1991. Zur Lebensdauer der Bauten - Ist Dauerhaftigkeit heute noch gefragt ?. *Die Perspektive* , 1991 vol. 4, p.14-16.

ISELIN, F. ET LEQUAY H. , 1994. Comment prévoir le vieillissement des bâtiments ?. *Construction et énergie* , n°11 - août 1994, pp.13-15.

ISELIN, F. ET MENU, J. , 1989. *Une méthode pour la conception et la maintenance des enveloppes du bâtiment* . In : XIe congrès international, Paris, 19-23 juin 1989, La qualité pour les usagers des bâtiments à travers le monde, CIB 89 . Conseil International du Bâtiment pour la Recherche, l'Etude et la Documentation : Paris, La Villette, pp.575-581.

ISELIN, F., LEQUAY, H. ET BERCIoux, H. , 1994. *AMB : Analyse et Modélisation du Bâtiment* . In : Colloque "Pathologie du Bâtiment", Symposium CIB WS94, Conseil International du Bâtiment, 30. sept. 1994. CIB WS94 : Varenna (Italie).

ISELIN, F., MENU, J. ET DE TRENTINIAN, L. , 1985. ACE : Une aide à la conception d'enveloppes architecturales. *Chantiers / Suisse* , Vol 16, 5/85.

ISO 10545-6 :1996. *Carreaux et dalles céramiques – Partie 6 : Détermination de la résistance à l'abrasion de surface pour les carreaux et dalles non émaillés (A vérifier)* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 12947-1 :1998. *Textiles – Détermination de la résistance à l'abrasion des étoffes par la méthode Martindale – Partie 1 : Appareillage d'essai d'abrasion de Martindale* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-1 :2000. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 1 : Principes généraux* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-10 :2009. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 10 : When to assess functional performance* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-2 :2001. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 2 : Procédures pour la prévion de la durée de vie* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-3 :2002. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 3 : Audits et revues des performances* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-5 :2008. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 5 : Approche en coût global* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-6 :2005. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 6 : Procédés pour la considération d'effets sur l'environnement* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-7 :2006. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 7 : Évaluation de la performance de l'information en retour relative à la durée de vie, issue de la pratique* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-8 :2008. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 8 : Durée de vie documentée et estimation de la durée de vie* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 15686-9 :2008. *Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévion de la durée de vie - Partie 9 : Lignes directrices pour l'évaluation des données relatives à la durée de vie* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 23337 :2007. *Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique - Détermination de la résistance à l'abrasion à l'aide d'une machine de Lambourn perfectionnée* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 24338 :2006. *Revêtements de sol stratifiés - Détermination de la résistance à l'abrasion* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 5470-1 :1999. *Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique - Détermination de la résistance à l'usure - Partie 1 : Appareil d'essai d'abrasion Taber* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 5470-2 :2003. *Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique – Détermination de la résistance à l'usure, Partie 2 : Appareil d'essai d'abrasion Martindale* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 6241 :1984. *Normes de performance dans le bâtiment - Principes d'établissement et facteurs à considérer* . Genève : International Standard Organisation (ISO), 10 p.

ISO 6272-1 :2002. *Peintures et vernis – Essais de déformation rapide (résistance au choc) – Partie 1 : Essai de chute d'une masse avec pénétrateur de surface importante* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 6272-2 :2002. *Peintures et vernis – Essais de déformation rapide (résistance au choc) – Partie 2 : Essai de chute d'une masse avec pénétrateur de surface réduite* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 7784-1 :1997. *Peintures et vernis - Détermination de la résistance à l'abrasion - Partie 1 : Méthode utilisant une roue revêtue de papier abrasif* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 7892 :1988. *Ouvrages verticaux des constructions – Essais de résistance aux chocs – Corps de chocs et modalités des essais de choc* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 9223 :1992. *Corrosion des métaux et alliages - Corrosivité des atmosphères - Classification* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

ISO 9224 :1992. *Corrosion des métaux et alliages - Corrosivité des atmosphères - Valeurs de référence relatives aux classes de corrosivité* . Genève : International Standard Organisation (ISO).

JERNBERG, P. ET AL. , 2004. *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components - Part I - Service Life and Durability Research* . CIB W80 / RILEM TC 140.

Disponible à : <http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/Pub295.html>

[Accédé le : 20.08.2009].

JERNBERG, P. ET AL. , 2004. *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components - Part III - Building Materials and Components : Characterisation of Degradation* . CIB W80 / RILEM TC 140.

Disponible à : <http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/Pub295.html>

[Accédé le : 20.08.2009].

JERNBERG, P., LACASSE, M., HAAGENRUD, S. ET SJÖSTRÖM, C. , 2004. *Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components* ., Rotterdam : CIB W80/RILEM, Publication 295, 377 p.

Disponible à : <http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/Pub295.html>

[Accédé le : 20.08.2009].

KLOPFER, H. , 1976. *Anstrichschäden , Strukturen, Verhaltensweisen und Schadensformen von Anstrichen und Kunststoffbeschichtungen* . Wiesbaden, Berlin : Bauverlag.

KLOPFER, H. , 1978. Die Carbonatisation von Sichtbeton und ihre Bekämpfung. *Bautenschutz + Bau-sanierung*, 1978-3, 86-97.

KÖHL, M. ET AL. , 2005. *Life-time estimation of polymeric glazing materials for solar applications* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-183.

KÖNIG, H., KOHLER, N., KREISSIG, J. ET LÜTZKENDORF, T. , 2009. *Lebenszyklus-Analyse in der Gebäudeplanung* . Basel : Birkhäuser.

KRAUTHL, W. , 1996. , *Introduction To Monte Carlo Algorithms* . Kertesz, J. and Kondor, I., 1998. *Advances in Computer Simulation - Lecture Notes in Physics* Springer Verlag.

Disponible à : <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/9612186v2>

[Accédé le : 06.01.2010].

LACASSE, M.A. ET SJÖSTRÖM, C. , 2005. *Advances in methods for service life prediction of building materials and components - final report. Activities of the CIB W80* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT6-223.

LAUTER, P., TIME, B., HOVDEI, P.J. ET NORE, K. , 2005. *Influence of material quality and climate exposure on moisture, condition of a wooden façade* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-129.

MAGGI P. M. , 2005. *Durability experimental evaluation of building components in sustainable production process : The Italian research program* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT4-117.

MARTEINSSON, B., SIGURJÓNSSON, J., STEFANSSON, P. ET SIGURDSSON, P. , 2005. *Atmospheric corrosion of metals in Iceland - characterisation of the environment and five-year results* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-105.

MC DULING, J., HORAK, E. ET CLOETE, C. , 2008. *Service Life Prediction beyond the "Factor Method"* . In : Durability of building Materials and Components 11. : Istambul, T42-87.

MINIOTAITE, R. ET CHEVALIER, J.-L. , 2005. *The Compatibility of Finish and Base Coatings of External Buildings Walls Influenced by Environmental Effects* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT2-40.

MOSER, K. , 2004. *Engineering Design Methods for Service Life Prediction* . State of the Art Report - Factor methods for service life prediction and Engineering design methods for service life prediction CIB W080, pp.52-95.

MOZARYN, T. ET SCISLEWSKI, Z. , 2005. *Estimation of the Performance over the Time Function for the Protective Epoxy Coatings Executed on Concrete Products* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT4-204.

OFFENSTEIN, F. , 1988. *Compatibles, incompatibles ou comment associer les matériaux de construction* . Paris : Editions du Moniteur.

PAHUD, D. ET AL. , 2005. *Durability of flat roofs : practical experience on service life and consequences on the maintenance strategy* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT6-235.

PERRAULT, C. , 1684. *Les dix Livres d'Architecture de Vitruve, corrigés et traduits en 1684 par Claude Perrault* . Bruxelles : Pierre Mardaga, 1979.

RE CECCONI, F. ET IACONO, P. , 2005. *Enhancing the Factor Method - Suggestions to Avoid Subjectivity* . In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT4-172.

RUESCH, F. ET BRUNOLD, S. , 2008. *Langzeituntersuchung an Abdeckungsmaterialien für thermische Sonnenkollektoren, Ergebnisse einer 20-jährigen Freibewitterungstudie, Schlussbericht* ., Oberseestr. 10,

CH-8640 Rapperswil : Insitut für Solartechnik (SPF) - HS Rapperswil (HSR), 60.

Disponible à : http://solarenergy.ch/publ/materialien/Freibewitterung_Bericht_16-07-2008.pdf

[Accédé le : 30.07.2008].

RUSAM, H. , 2004. *Anstriche und Beschichtungen im Bauwesen, Eigenschaften - Untergründe - Anwendungen* . Fraunhofer IRB Verlag.

SCHRÖDER, J. , 1989. Zustandsbewertung grosser Gebäudebestände. *Schweizer Ingenieur und Architekt* , April 1998, Nr 17, pp.449-459.

Disponible à : <http://retro.seals.ch/cntmng?type=pdf&rid=sbz-003:1989:107::255&subp= hires>

[Accédé le : 17.02.2010].

SCHRÖDER, J., CHRISTEN, K. ET GROB, J. , 1992. Hauptbegriffe der Bauwerkserhaltung. *Schweizer Ingenieur und Architekt* , Vov. 1992, Nr.45, pp.841-845.

Disponible à : <http://retro.seals.ch/cntmng?type=pdf&rid=sbz-003:1992:110::708&subp= hires>

[Accédé le : 17.02.2010].

SEREDA, P.J. , 1973. Comportement des matériaux de construction. *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-115-F.

SEREDA, P.J. , 1975. Corrosion atmosphérique des métaux. *Digests de la construction au Canada, Canadian Building Digest (CBD)* , CBD-170-F.

Disponible à : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-170.html>

[Accédé le : 03.12.2008].

SIA 180 :1999. *SIA 180 - Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments* . Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA).

SIA V280 :1996. *SIA V280 - Lés d'étanchéité en matière synthétique (lés polymères) - Performances exigées et essais des matériaux* . Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA).

SJÖSTRÖM, C., TRINIUS, W., CHEVALIER, J.-L. ET JASUJA, M. , 2005. , *PeBBu Domain 1 Final Report, Life Performance of Construction Materials & Components* .

Disponible à : http://www.pebbu.nl/resources/allreports/downloads/05_D1_finalreport.pdf

[Accédé le : 14.08.2008].

SJÖSTRÖM, C., TRINIUS, W., DAVIES, H. ET LAIR, J. , 2008. *International Standards on Durability and Sustainability of Construction Works* . In : *Durability of building Materials and Components 11.* : Istanbul, T45-89.

TALON, A. , 2005. *Temporal quantification method of degradation scenarios based on FMEA* . In : 10th International Conference On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT4-139, publié également dans Talon et al. (2006), p.21-28.

TALON, A., BOISSIER, D. ET HANS, J. , 2008. *A Multi-Performance Approach for Service Life Prediction* . In : *Durability of building Materials and Components 11.* : Istanbul, T42-357.

TALON, A., BOISSIER, D., CHEVALIER, J.-L. ET HANS, J. , 2004. *A Methodological and Graphical Decision Tool for Evaluating Building Component Failure* . In : *Proceedings of the CIB World Building Congress (CIB WBC 2004)*, Toronto, Canada, 2-7 May 2004., T2S5, publié également dans Talon et al. (2006), p.29-39.

TALON, A., CHEVALIER, J.-L. ET HANS, J. , 2006. *Failure Modes Effects and Criticality Analysis, Research for and Application to the Building Domain - State of the art Report .*, Rotterdam : CIB W080 Prediction of Service Life for Buildings and Components, CIB Report 310, 254 p.
Disponible à : http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/CIBW80_FMEA.pdf
[Accédé le : 20.08.2009].

TRINIUS, W. , 2005. *ISO 15686-6 - Procedure for Considering Environmental Impacts .* In : 10th International Conference On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT5-201.

VALLEY, S. , 1965. *Handbook of geophysics and space environments .* New York a.o. : McGraw-Hill.

VAN DE KUILEN, J.W. ET MONTARULI, N.E. , 2008. *Timber Structures Service Life Modelling .* In : Durability of building Materials and Components 11. : Istambul, T42-531.

ZHANG, Y., AUGENBROE, G. ET VIDAKOVIC, B. , 2005. *Uncertainty Analysis in Using Markov Chain Model to Predict Roof Life Cycle Performance .* In : 10th International Conférence On Durability of Building Materials and Components (10dbmc), Lyon, France 17-20 april 2005. CSTB : Lyon, France, TT5-96.

ZHOU, Y., KIJEWSKI, T. ET KAREEM, A. , 2002. Along-Wind Load Effects on Tall Buildings : Comparative, Study of Major International Codes and Standards. *Journal of Structural Engineering* , june 2002, pp.778-796.
Disponible à : [http://www.nd.edu/~athaz/journals/\(2002\)Along-Wind_Load_Effects_on_Tall_Buildings.pdf](http://www.nd.edu/~athaz/journals/(2002)Along-Wind_Load_Effects_on_Tall_Buildings.pdf)
[Accédé le : 27.07.2009].

Table des figures

2.1	Pont romain d'Ambrussum, France	10
2.2	Cathédrale de Syracuse, Sicile	10
2.3	Procédure ISO 15686-6	12
2.4	Approche performantielle	13
2.5	Parc immobilier Suisse	21
2.6	Courbes méthode statistique	22
2.7	Moment de remplacement : Fenêtres	23
2.8	Méthodologie systématique	25
2.9	Types de durée de vie	26
2.10	Format données EVA-Perfs	28
2.11	Grille EVA-Perfs	29
2.12	Approche CSTB	30
2.13	Décomposition structurelles	31
2.14	Table AMDE	31
2.15	Graphe d'événements	32
2.16	Principe d'évaluation de la durée des scénarii de dégradation	32
2.17	Différence entre système avec et sans "mémoire"	34
2.18	Echelle d'évaluation des conditions	34
2.19	Markov deterioration function	35
2.20	Courbes de dégradation	37
2.21	Résultats d'essais de vieillissement pour des verres PVC	38
2.22	Corrélation entre des cycles de vieillissement artificiel et le temps réel d'une exposition naturelle	38
3.1	Les composants ont des <i>Performances</i> et subissent des <i>Contraintes</i>	44
3.2	Les contraintes sont atténuées par les diverses couches	45
3.3	Schéma modèle	46
3.4	La première défaillance est déterminante pour détecter la fin de vie	48
3.5	Exemples de rosaces multi-performances	48
3.6	Différents composants du modèle	50
3.7	Propagation directionnelle	52
3.8	Schéma électrique équivalent de la propagation à flux constant	53
3.9	Exemples de contraintes pour lesquelles il existe des méthodes de tests similaires	57
3.10	Correspondances entre Meso-Environnement et Micro-Environnement	58
3.11	Le type d'élément dépend de sa position dans le bâtiment	61
3.12	Attribution des rôles en fonction du type d'élément	62
3.13	Classification des types d'élément d'après leur situation d'expositions et leur inclinaison	63
4.1	Différents composants du modèle	66
4.2	Représentation graphique du modèle de simulation pour une paroi de deux couches	67
4.3	Fenêtre Paroi du logiciel de simulation	68
4.4	Arborescence des classes de matériaux	71
4.5	Interface utilisateur - <i>Milieu extérieur</i>	74
4.6	Interface utilisateur - <i>Milieu intérieur</i>	74

4.7	La boucle itérative	77
4.8	Exemple de procédure pour initialiser une contrainte - Contrainte Mouillage avec Milieu extérieur	78
4.9	Initialisation des performances de la classe "Carreaux Céramiques"	79
4.10	Présentation schématique de la <i>Propagation des contraintes</i>	81
4.11	Illustration de la formule 4.5	82
4.12	Illustration de la relation 4.8	83
4.13	Variation de performances <i>Matelas de laine de verre</i>	84
4.14	Cont-Discret	85
4.15	Courbes de performances avec différents Δt	86
4.16	Influence de la durée de l'intervalle de simulation Δt sur le résultat	86
4.17	Distribution d'une variable aléatoire, Fonction de répartition	89
4.18	Principe de la méthode probabiliste	90
4.19	Résultat d'une simulation avec la méthode probabiliste (10'000 essais)	90
4.20	Fonction de répartition des résultats de figure 4.19	91
4.21	Distribution des résultats après 100, 1'000 et 10'000 essais	91
5.1	Règles pour déterminer la contrainte <i>Usure mécanique</i> d'un milieu extérieur	97
5.2	Règles pour déterminer la contrainte <i>Usure mécanique</i> d'un milieu intérieur	97
5.3	Règles pour déterminer la contrainte <i>Délavage</i> d'un milieu extérieur	99
5.4	Essai de chocs SIA V280	101
5.5	Essais de Pendule pour déterminer la résistance aux chocs selon la norme ISO 7892	101
5.6	Règles pour déterminer la contrainte <i>Choc</i> d'un milieu extérieur	103
5.7	Règles pour déterminer la contrainte <i>Mouillage</i> d'un milieu extérieur	106
5.8	Règles pour déterminer la contrainte <i>Mouillage</i> d'un milieu intérieur	106
5.9	Règles pour déterminer la contrainte <i>Polluants</i> d'un milieu extérieur	108
5.10	Règles pour déterminer la contrainte <i>Polluants</i> d'un milieu intérieur	108
5.11	Carte des vents Suisse (source : www.wind-data.ch)	109
5.12	La vitesse du vent a des caractéristiques aléatoires	110
5.13	Profils de vitesses moyennes sur trois types de terrain pour un vent de 60 km/h	110
5.14	Règles pour déterminer la contrainte <i>Courants d'air</i> des milieux extérieurs	112
5.15	Règles pour déterminer la contrainte <i>Courants d'air</i> des milieux intérieurs	112
5.16	Radiation spectrale du soleil avec et sans absorption atmosphérique	113
5.17	Carte suisse de l'irradiation globale pour un plan horizontal	115
5.18	Rayonnement global annuel atteignant une surface en fonction de son inclinaison et de son orientation ($100\% = 1300[\frac{kWh}{m^2 \cdot a}]$), latitude 48°	116
5.19	Règles pour déterminer la contrainte <i>Lumière</i> d'un milieu extérieur	117
5.20	Règles pour déterminer la contrainte <i>Lumière</i> d'un milieu intérieur	117
5.21	Distribution des températures en fonction de l'altitude d'après SIA180 :1999, tab. 11	118
5.22	Evolution de l'humidité relative HR en fonction de l'altitude au mois de janvier	119
5.23	Règles pour déterminer la température d'un milieu intérieur	120
5.24	Règles pour déterminer l'humidité relative (HR) dans un milieu intérieur	121
5.25	Détermination de la contrainte <i>Gel</i> à partir des contraintes <i>Mouillage</i> , <i>Courants d'air</i> et <i>Température</i>	124
5.26	Gel3D	124
5.27	Contrainte <i>Pourriture</i> déterminée à partir des contraintes <i>Mouillage</i> et <i>Courants d'air</i>	126
6.1	Relation entre les niveaux de performance et la perte d'épaisseur	131
6.2	Niveaux de la contrainte <i>Poinçonnement</i>	134
7.1	Façade ventilée - Coupe	146
7.2	Composition d'une façade ventilée avec bardage en bois	146
7.3	Modèle de simulation correspondant à l'exemple étudié	147

7.4	Etat du modèle à l'initialisation et au temps de calcul 50 ans	148
7.5	Evolution des Performances Epaisseur en pourcentage de l'épaisseur originale	149
7.6	Fonctions de répartition pour des évènements de niveau 5.	150
7.7	Courbes de performances et de contraintes	151
7.8	Coupe toiture plate	152
7.9	Composition de la toiture plate	152
7.10	Dialogue pour définir l'objet <i>Paroi</i>	152
7.11	Fonctions de répartition pour les évènements I à VI	154
A.1	Métaux et alliages utilisés dans la construction	165
A.2	Evolution de la profondeur de corrosion selon la norme ISO 9224 (1992)	169
A.3	Les performances <i>Résistance Statique</i> et <i>Absorption de Chocs</i> sont déterminées par l'épaisseur de la couche	170
A.4	Performances <i>Résistance Statique</i> et <i>Absorption de Chocs</i>	174
A.5	Niveau de la performance <i>Etanchéité à l'eau</i> en fonction de la pente pour différents types de tuiles	176
A.6	Composition générale des filmogènes	182
B.1	Modèle discret de la carbonatation	189
B.2	Modelisation de béton armé	190
B.3	Modèle discret de carbonatation	191
B.4	Analogies	193
C.1	Fenêtres du logiciel ACE 4 version de 1990	196

Liste des tableaux

2.1	Exigences humaines de Blachère	14
2.2	ISO 15686, les parties	24
2.3	Durées de vies minimales	26
2.4	Facteurs modifiants	27
4.1	Performances de base	70
4.2	Catégories du paramètre <i>Fréquentation</i>	73
4.3	Catégories d' <i>Environnement</i>	73
4.4	Exemples de configuration de quelques milieux extérieurs	74
4.5	Catégories d'activité	75
4.6	Catégories de vêtue	75
4.7	Nuisances intérieures	75
4.8	Exemples de configuration de quelques milieux intérieurs	76
4.9	Exemples de règles pour la définition des seuils de défaillance	79
4.10	Signification des catégories d'alerte	79
4.11	Influence du nombre d'essais	91
5.1	Sélection des contraintes	93
5.2	Agents de ISO 6241 :1984	94
5.3	Normes déterminant la résistance à l'abrasion	95
5.4	Classes d'usure mécanique selon ISO 10545-7	96
5.5	Niveaux de la contrainte <i>Usure mécanique</i>	96
5.6	Niveaux de la contrainte <i>Délavage</i>	98
5.7	Niveaux de la contrainte <i>Chocs</i>	102
5.8	Niveaux de la contrainte <i>Mouillage</i>	105
5.9	Niveaux de la contrainte <i>Polluants</i>	107
5.10	Niveaux de la contrainte <i>Courants d'air</i>	112
5.11	Division du spectre électromagnétique	114
5.12	Niveaux de la contrainte <i>Lumière</i>	116
5.13	Humidité relative de SIA180 :1999	119
5.14	Conditions normales d'utilisation : Température intérieure	120
5.15	Echelle du pH	122
6.1	Condition Assessment Scales	127
6.2	Performances de base	128
6.3	Normes déterminant la résistance à l'abrasion	131
6.4	Niveaux de la performance <i>Résistance statique</i>	132
6.5	Niveaux de la performance <i>Résistance aux chocs</i>	133
6.6	Catégories d'impacts selon BS 8200 :1985	134
6.7	Classes de sollicitations aux chocs selon la norme ISO 7892	134
6.8	Niveaux de la performance <i>Absorption de chocs</i>	136
6.9	Niveaux de la performance <i>Étanchéité à la lumière</i>	137
6.10	Niveaux de la performance <i>Étanchéité à l'eau</i>	138
6.11	Niveaux de la performance <i>Étanchéité à l'air</i>	139

6.12	Coefficients de diffusion de CO ₂ pour différents matériaux	141
6.13	Niveaux de la performance <i>Aspect</i>	142
6.14	Niveaux de la performance <i>Etat de surface</i>	143
7.1	Attributs des milieux A et B	146
7.2	Contraintes sur les faces A et B	147
7.3	Performances initiales des diverses couches	147
7.4	Facade ventilée - Evènements de défaillance	149
7.5	Attributs des milieux A et B	153
7.6	Contraintes sur les faces A et B	153
7.7	Toiture plate - Evènements de défaillance	154
A.2	Classification des matériaux AMB	164
A.3	Classification de la <i>durée de persistance</i> de l'humidité sur les surfaces	167
A.4	ISO 9223 : Classification de la <i>pollution soufre</i>	167
A.5	ISO 9223 : Classification de la <i>pollution chlorures</i>	168
A.6	Classes de corrosivité de l'atmosphère	168
A.7	Valeurs de référence pour la de vitesses de corrosion	169
C.1	Présentation d'ACE dans des conférences	197
D.1	Publications édités par le CIB W080	217
D.2	Conférences <i>dbmc</i>	218

CURRICULUM VITAE

ZURBRÜGG PIERRE

Route de Daillens 8, CH-1305 Penthalaz

tél. 021 861 35 16

mob. 079 751 21 00

e-mail: pierre.zurbruegg[at]epfl.ch

2 avril 1965

marié

Suisse



FORMATION ET DIPLÔMES

Thèse de doctorat au Laboratoire de Construction et de Conservation de l'EPFL <i>Titre de Docteur ès Sciences (nov. 2010)</i>	2004-2010
Etudes à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne <i>Diplôme d'architecte EPFL (avril 1997)</i>	1991-1997
Préparation individuelle et examen de la maturité fédérale <i>Maturité fédérale type scientifique (mars 1991)</i>	1989-1991
Etudes à l'école d'ingénieur de Rapperswil SG <i>Diplôme d'ingénieur électricien ETS (nov. 1987)</i>	1984-1987
Apprentissage chez Spectrospin SA à Fällanden ZH <i>CFC de Monteur électronique (juin 1984)</i>	1980-1984

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

EPFL, section d'architecture <i>chargé de cours externe (20-40%)</i>	depuis 2007
EPFL, Laboratoire de Construction et Conservation (LCC1) <i>assistanat à l'enseignement (temps partiel)</i>	2001-2007
Architecte indépendant à Penthalaz	depuis 1997
Câbleries et Tréfileries de Cossonay SA à Cossonay-Gare VD <i>ingénieur au département «R&D Energie»</i>	1988-1991
Spectrospin SA à Fällanden ZH <i>apprenti électronicien</i>	1980-1984

ENSEIGNEMENT EPFL

<i>Architecture et réhabilitation (Construction, structures, physique du bâtiment)</i>	
Unité d'enseignement (Section d'architecture - cycle Master)	depuis 2001
Cours de construction (Section d'architecture - cycle Master)	depuis 2005
<i>Installations techniques et conception énergétique</i>	
Cours de construction (Section d'architecture - cycle Bachelor 3 ^{ème} année)	depuis 2004
Unité d'enseignement (Section d'architecture - cycle Master)	depuis 2010
<i>Enseignement transdisciplinaire</i>	
Unité d'enseignement Réhabilitation (Faculté ENAC - cycle Bachelor 3 ^{ème} année)	2005-2008

LANGUES

français
allemand (langue maternelle)
anglais